

Resumen

Este proyecto consiste en la realización de un estudio numérico mediante un software de simulación numérica con computador (Ansys) de un flujo de agua con cavitación bajo unas condiciones físicas determinadas alrededor de un perfil hidrodinámico NACA 0009.

Se ha simulado el comportamiento del flujo de agua alrededor del perfil hidrodinámico bajo diferentes condiciones de presión. Se ha ido disminuyendo el valor de la presión y consecuentemente del coeficiente de cavitación sigma, σ , hasta alcanzar niveles de presión de vapor con el objetivo de poder llegar a reproducir y analizar la aparición del fenómeno de la cavitación y su evolución a lo largo del perfil, manteniendo el resto de parámetros constantes.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se han analizado los valores de los coeficientes adimensionales de presión (C_p), sustentación (C_L) y resistencia al avance (C_D) y la longitud de lámina de cavitación en función de σ .

Finalmente, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos mediante simulación numérica con computador con los que se obtuvieron en un experimento realizado con el mismo perfil (NACA 0009) bajo condiciones similares por un grupo de investigadores de *l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suiza*. De esta forma se pretende verificar que las simulaciones obtenidas reproducen fielmente el fenómeno físico bajo estudio.



Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. PREFACIO	5
1.1. Origen del proyecto	5
1.2. Motivación	5
1.3. Requerimientos previos.....	6
2. CONCEPTOS ELEMENTALES DE DINÁMICA DE FLUIDOS	7
2.1. Número de Mach.....	7
2.2. Viscosidad	8
2.3. Tipos de flujos	9
2.3.1. Flujo estacionario y no estacionario	9
2.3.2. Flujo incompresible y compresible	9
2.3.3. Flujo subsónico a hipersónico	9
2.3.4. Capa límite: laminar y turbulenta.....	10
2.3.5. Numero de Reynolds	11
2.3.6. Ecuación de continuidad	12
2.3.7. Principio de Bernoulli	12
2.3.8. Cavitación	13
2.3.8.1. Descripción del fenómeno	13
2.3.8.2. Posibles formas de las cavidades de vapor	14
2.3.8.3. Efectos y Consecuencias	14
2.3.8.4. Lugares de posible aparición.....	15
2.3.8.5. Coeficiente sigma (σ)	15
2.4. Perfil alar, sus partes y otros conceptos del ala	16
2.5. Nomenclatura de los perfiles NACA.....	17
2.6. Fuerzas Aerodinámicas.....	18
3. INTRODUCCIÓN	22
3.1. Objetivos del proyecto	22
3.2. Alcance del proyecto	22
3.3. CFD (Dinámica Computacional de Fluidos)	23
3.3.1. Simulaciones CFD vs experimentación.....	24

4. ESTUDIO DE LA CAVITACIÓN SOBRE UN PERFIL NACA 0009	26
4.1. Simulaciones preliminares	26
4.2. Geometría NACA 0009	26
4.2.1. Antecedentes	26
4.2.2. Definición de la geometría	27
4.3. Dominio de estudio	28
4.4. Mallado	29
4.4.1. Mallado del dominio de estudio	29
4.5. Parámetros de la simulación	32
4.6. Puntos de monitorización	33
4.7. Análisis de los residuos	36
4.8. Resultados de las simulaciones	37
4.8.1. Fracción de volumen	37
4.8.2. Coeficiente de presión (C_p)	47
4.8.3. Longitud de la lámina de cavitación	54
4.8.3.1. Comparación de los valores obtenidos mediante la fracción de vapor y mediante el C_p	54
4.8.3.2. Comparación de los resultados obtenidos mediante simulación y los obtenidos experimentalmente	56
4.8.4. Coeficiente de sustentación (C_L) y de resistencia al avance (C_D)	59
5. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	64
6. PRESUPUESTO	65
CONCLUSIONES	67
AGRADECIMIENTOS	69
BIBLIOGRAFÍA	70
Referencias bibliográficas	70
Bibliografía Complementaria	71



1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

El origen del proyecto proviene de unos experimentos realizados por un grupo de investigadores en el año 2010 en el túnel de cavitación del laboratorio de máquinas hidráulicas de *l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suiza*.

Los experimentos fueron llevados a cabo en un túnel de agua en el que se sometía un perfil de ala de tipo Naca 0009 a unas condiciones determinadas de presión, temperatura y velocidad del fluido . Concretamente se fue bajando la presión hasta llegar a la presión de vapor en el contorno del ala con el fin de que apareciera el fenómeno de la cavitación. Con todo ello, se obtuvieron medidas experimentales de diferentes parámetros relevantes del flujo y sus acciones sobre el cuerpo.

En el caso del experimento, el perfil Naca 0009, se encontraba cortado por la parte final y además la parte cercana al borde de ataque del ala tenía una cierta rugosidad para asegurar que la lámina de cavitación empezase de forma homogénea siempre en la misma zona.

Sin embargo, en el perfil utilizado para este trabajo de simulación no se dan ninguna de las dos condiciones expuestas anteriormente, ya que se usa el perfil entero y sin rugosidad al principio por diversos motivos que se explican posteriormente.

1.2. Motivación

La motivación por la realización de este proyecto viene fundamentada por varios motivos.

Desde muy pequeño me he sentido muy atraído por todo lo relacionado con el mundo naval y aeroespacial. De este modo, siempre me ha parecido fascinante a la vez que muy interesante el estudio aerodinámico en general, sobre todo en el caso de vehículos y aviones.

Por ahora, la única asignatura que he cursado en la carrera relacionada con este aspecto es Mecánica de Fluidos, la cual me pareció una de las más interesantes y es por ello que me apetecía profundizar mis estudios en este ámbito. Sobre todo en la vertiente aerodinámica ya que como he comentado anteriormente es una de mis pasiones.

Por otra parte, mientras cursaba Mecánica de Fluidos, se realizó una práctica que trataba sobre la simulación numérica del comportamiento de un fluido a través de un perfil alar mediante un software de CFX. Dicha práctica me hizo entender muchos aspectos aerodinámicos que desconocía y profundizar otros que ya conocía. Es por ello, que me decidí a hacer un trabajo que en cierto modo tratará sobre algún aspecto relacionado con los tratados en la práctica y durante la asignatura.

Una vez decidido el ámbito en el cual quería realizar el trabajo de fin de grado, me puse en contacto con un profesor del departamento de *Mecánica de Fluidos*, el Sr. Francesc Xavier Escaler Puigdoríol, al cual le expuse lo que quería realizar y juntos decidimos el tema del cual trata este trabajo.

1.3. Requerimientos previos

Haber cursado la asignatura de *Mecánica de Fluidos* y conocer con profundidad todos los aspectos aerodinámicos que se tratan en ella.

Tener un conocimiento básico del uso de un programa de software de tipo CFD (Dinámica Computacional de Fluidos), en nuestro caso el software utilizado es el Ansys, Inc. También es necesario saber entender los resultados obtenidos mediante las simulaciones con el fin de poder interpretarlos satisfactoriamente y saber compararlos con otros resultados del mismo experimento obtenidos mediante otras fuentes.

2. Conceptos elementales de dinámica de fluidos

Este trabajo trata sobre la realización de una simulación fluidodinámica de un perfil NACA 0009 sometido al paso de un fluido (agua) mediante el uso de un software de simulación de dinámica de fluidos (CFD). Concretamente, se pretende simular la formación de cavitación en la cara de succión del perfil. Los resultados de la simulación se contrastarán con valores experimentales obtenidos durante una serie de ensayos realizados en el túnel de cavitación de la École polytechnique fédérale de Lausanne en Suiza.

Por todo ello, resulta de vital importancia entender y conocer las bases de la *mecánica de fluidos* para poder comprender completamente el contenido de este trabajo.

Mecánica de fluidos es la rama de la *mecánica de medios continuos* que estudia el movimiento de los fluidos (gases y líquidos) así como las fuerzas que lo provocan. También estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita. Dentro de esta disciplina se desarrolla la *Aerodinámica* cuya palabra proviene del griego y que está compuesta por otras dos palabras: *aeros*, que significa aire, y *dynamis*, que significa fuerza. Así, la aerodinámica se entiende como el estudio de las fuerzas y los movimientos que se dan en los objetos que tienen un movimiento relativo a un fluido. Una definición más actual del término *aerodinámica* es: *rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen en los objetos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre éstos y el fluido que los baña*.

A continuación, se explican con un poco más de detalle algunos conceptos básicos de la aerodinámica que hace falta conocer con el fin de entender el contenido de este trabajo a la perfección.

2.1. Número de Mach

El número de Mach es un número que se utiliza como referencia de la velocidad. Sirve para evaluar si los fenómenos debidos al cambio de densidad del aire (compresibilidad), tienen importancia relevante, o por lo contrario, resultan despreciables.

Se define el número de Mach como el cociente entre la velocidad de un objeto (v) y la velocidad del sonido (v_{so}) en el medio en que se mueve dicho objeto.

Así pues, la fórmula que lo define es la siguiente:

$$M = \frac{v}{v_{so}}$$

2.2. Viscosidad

La viscosidad es la propiedad que describe la oposición de un fluido a sufrir deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares. Un fluido que no tiene viscosidad se le llama fluido ideal.

La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento y se define como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de *viscosidad absoluta* o *viscosidad dinámica*. Generalmente se representa por la letra griega μ .

Se conoce también otra viscosidad, denominada *viscosidad cinemática*, y se representa por ν . Para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica por la densidad del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Siendo μ la viscosidad dinámica y ρ la densidad del fluido.

En el trabajo que nos concierne, tenemos un ala desplazándose a cierta velocidad, motivo por el cual se comprueba experimentalmente que la capa de fluido en contacto con el ala se mueve como si viajara adherida a la misma, moviéndose a su misma velocidad. La capa de fluido situada inmediatamente por debajo, se desplaza en la misma dirección, pero en este caso con una velocidad ligeramente inferior, debido al rozamiento existente entre las capas de aire. Todo esto ocurre sucesivamente en las siguientes capas.

La fricción interna dentro del fluido es originada por la viscosidad. Es más, debido a que el aire es un fluido viscoso los aviones pueden volar. Por lo contrario, en el caso de que éste no fuera viscoso, las diversas capas de fluido no viajarían adheridas a la superficie del ala, y por tanto no se originarían las fuerzas características que permiten a un avión poder volar.

2.3. Tipos de flujos

Se establecen distintas clasificaciones para los problemas de mecánica de fluidos relacionados con el estudio aerodinámico sobre un cuerpo en función de su naturaleza y del número de Mach.

A continuación, se explican varias de estas clasificaciones.

2.3.1. Flujo estacionario y no estacionario

- *Flujo estacionario o permanente*: Es aquel flujo en el que las propiedades del fluido se mantienen constantes al paso del tiempo.
- *Flujo transitorio o no estacionario*: Es aquel flujo en el que las propiedades del fluido sí que dependen del paso del tiempo y como consecuencia varían.

2.3.2. Flujo incompresible y compresible

- *Flujo incompresible*, en el que la velocidad del fluido, v , es menor que $0,3 \cdot Ma$ (Ma = número de Mach).
- *Flujo compresible*, en el que la velocidad del viento relativo es superior a $0,3 \cdot M$.

2.3.3. Flujo subsónico a hipersónico

- *Subsónico*: la velocidad del flujo que estudiamos es inferior a la velocidad del sonido, $Ma < 1$.
- *Transónico*: los valores de Ma están en torno a 1.
- *Supersónico*: cuando Ma es mayor que 1.
- *Hipersónico*: cuando la velocidad del fluido es mucho mayor que la velocidad del sonido y $Ma > 6$.

2.3.4. Capa límite: laminar y turbulenta

En todo cuerpo, la capa de partículas de fluido que se encuentra en contacto con el mismo permanece adherida siempre a la superficie debido a las fuerzas interatómicas. Existe un deslizamiento entre las capas de fluido adyacentes a esta capa, las cuales, tienen una velocidad más cercana a la del fluido libre conforme más alejadas están de la superficie. La zona que existe entre la capa de aire que circula pegada a la superficie y la capa que pertenece a la corriente libre se conoce como *capa límite*.

De este modo, definimos la *capa límite* como la zona en la cual el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. Se entiende como aquella zona en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero (adherido a la superficie del fluido) hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.

Dentro de la capa límite podemos encontrarnos con dos casos:

Cuando el movimiento del aire dentro de la capa límite se da en forma de capas paralelas, se trata de un flujo *laminar*. En el caso de un perfil de ala, en los puntos cercanos al borde de ataque la capa límite es *laminar*, y conforme el fluido se va alejando del borde de ataque, las fuerzas de rozamiento disipan cada vez más energía, provocando un aumento paulatino del espesor de la capa límite, hasta que a una cierta distancia del borde de ataque, que depende de: la velocidad del fluido, la inclinación del ala, ... se producen unas perturbaciones caóticas que conllevan la destrucción de la corriente *laminar* existente hasta entonces, dando paso a la aparición de una *turbulenta*. La región o punto en que se produce el cambio de *laminar* a *turbulento* se denomina como *zona o punto de transición*.

En las figuras 2.3.4.1 y 2.3.4.2 se pueden visualizar los aspectos explicados anteriormente.

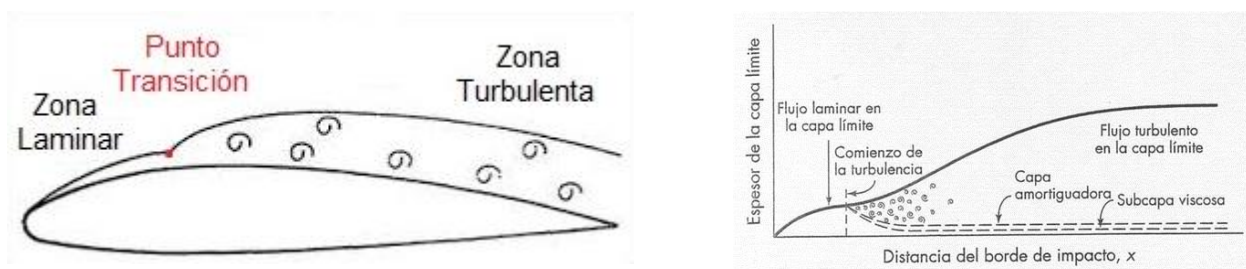


Figura 2.3.4.1 Zonas de la capa límite

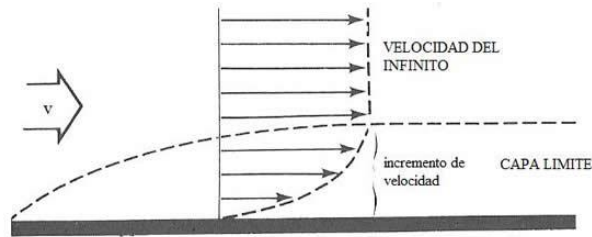


Figura 2.3.4.2 Perfil de velocidades en la capa límite

2.3.5. Numero de Reynolds

Anteriormente se ha mencionado que el punto de transición se encuentra a una cierta distancia del borde de ataque del ala. Sin embargo, este punto no solamente depende de la distancia característica, sino que también depende de la densidad, de la viscosidad (tipo de fluido) y de la velocidad del fluido que actúa.

Así pues, Reynolds materializó todas estas conclusiones en la creación de un parámetro adimensional que relaciona todas las magnitudes mencionadas con anterioridad. Dicho parámetro resulta ser el famoso número de Reynolds (Re), que se define como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Donde v es la velocidad, D la longitud característica del objeto de estudio, ρ la densidad del fluido y μ la viscosidad dinámica del mismo.

Para números de Reynolds pequeños la capa límite es laminar y en consecuencia para valores grandes de Reynolds la capa límite resulta ser turbulenta. Todo ello, se entiende fácilmente si se observa la fórmula de Reynolds, ya que se aprecia que a mayor distancia mayor es el valor del número de Reynolds y viceversa.

En el caso de este proyecto para calcular el número de Reynolds local se aplicará la ecuación para placa plana:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot x}{\mu}$$

Siendo x la distancia al borde de ataque.

Se establece también que el Reynolds de transición es de 200000. Por tanto, desde este valor tendremos por debajo un flujo laminar y por encima un flujo turbulento.

Cabe destacar que además del número de Reynolds, existen otros factores que afectan a la transición. Ellos son la temperatura de la superficie y el número de Mach. Generalmente, a menor temperatura de la superficie, menor es el espesor de la capa límite y la transición está más retrasada. En cuanto al número de Mach, el Re de transición suele ser mayor con un Mach elevado (flujo compresible).

2.3.6. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad es aquella que describe el comportamiento de un fluido a lo largo de un conducto cerrado. En mecánica de fluidos, la ecuación de continuidad, es la ecuación de conservación de la masa.

Por ejemplo: sean dos secciones S_1 y S_2 , con áreas A_1 y A_2 , de un tubo de corriente, la ecuación de la continuidad establece que la masa del fluido m_1 que pasa por segundo a través de la superficie S_1 es igual a la masa m_2 que pasa por segundo a través de la superficie S_2 . Es decir, la masa de fluido que entra por unidad de tiempo en el conducto es igual a la masa de fluido que sale por unidad de tiempo. Así pues, vemos que la ecuación de la continuidad acaba siendo la siguiente:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

O más comúnmente:

$$\rho \cdot A \cdot v = cte$$

2.3.7. Principio de Bernoulli

El Principio de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido que se mueve a lo largo de una línea de corriente. Expresa que un fluido ideal, es decir sin viscosidad ni rozamiento, circulando por un conducto cerrado, mantiene a lo largo de su recorrido la energía total constante. Esto se traduce en que un aumento en la velocidad del flujo implicará una disminución de la presión, y al contrario, una disminución en la velocidad del flujo implicará un aumento en la presión. La siguiente ecuación lo refleja:

$$P + \rho \cdot g \cdot z + \frac{v^2 \cdot \rho}{2} = cte$$

Siendo v es la velocidad del fluido, ρ su densidad, P la presión a lo largo de la línea de

corriente, g la aceleración de la gravedad y z la altura.

2.3.8. Cavitación

2.3.8.1. Descripción del fenómeno

Es un fenómeno físico que se caracteriza por la formación de cavidades de vapor en un fluido (líquido) sin aportación exterior de calor.

Se produce cuando la presión baja a niveles de la presión de vapor ($p \leq p_v$), manteniéndose la temperatura constante. Bajo dichas condiciones se generan burbujas de vapor iniciándose primero en los microgérmenes transportados por el líquido. En nuestro caso, perfil alar NACA 0009, cuando se produce cavitación, se forma una lámina de burbujas de vapor que va aumentando a medida que vamos disminuyendo la presión exterior o aumentando la velocidad del fluido en un punto del cuerpo, ya que ambos efectos provocan que la presión local de un punto cualquiera sobre la superficie disminuya.

En la siguiente figura se muestra de manera clara cómo para darse el fenómeno de cavitación, la transición líquido a vapor, se realiza según un proceso de calentamiento isotérmico mediante disminución de la presión del líquido hasta valores de saturación.

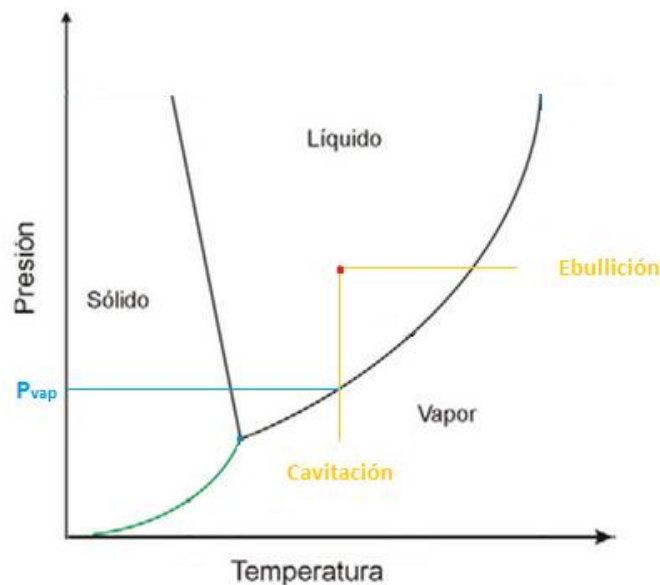


Figura 2.3.8.1.1 Diagrama Termodinámico de los estados de un cuerpo con las curvas de cambio de fase

La variación de la presión en un fluido viene determinada por la ecuación de Bernoulli sobre una línea de corriente:

$$\frac{P_{ext}}{\gamma} + z_{ext} + \frac{v_{ext}^2}{2g} = \frac{P_M}{\gamma} + z_M + \frac{v_M^2}{2g}$$

(Bernoulli entre dos puntos)

En la siguiente figura se ilustran los puntos entre los que se aplica el principio de Bernoulli:

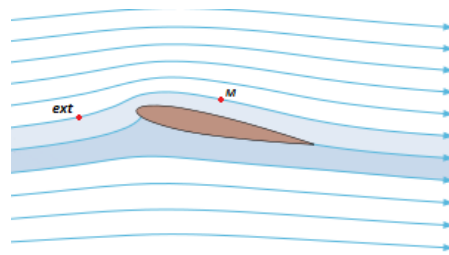


Figura 2.3.8.1.2

Si suponemos que $z_{ext} \approx z_M$ con el fin de simplificar la explicación, vemos que si:

- Disminuye la $P_{ext} \rightarrow$ Disminuye la $P_M \rightarrow$ Aparece Cavitación
- Aumenta la $v_{ext} \rightarrow$ Disminuye la $P_M \rightarrow$ Aparece Cavitación

2.3.8.2. Posibles formas de las cavidades de vapor

Las cavidades de vapor se presentan según formas diferentes:

- Láminas de vapor adheridas a las paredes sólidas. Son de carácter estable o inestable según la dinámica del flujo.
- Burbujas aisladas formadas de forma explosiva en las regiones de baja presión. Las burbujas de vapor creadas colapsan violentamente cuando llegan a una zona donde la presión aumenta generando presiones locales muy elevadas que producen erosión, vibraciones y ruido.
- Filamentos vorticales: Cavidades encuadradas en zonas de fuerte vorticidad dónde las presiones son bajas.

2.3.8.3. Efectos y Consecuencias

Seguidamente se indican los efectos provocados por la cavitación y las indeseables consecuencias con elevados costes asociados de cada uno de ellos.

Efectos:

- 1- Bloqueo y disminución de la sección de paso del líquido.
- 2- Vibración y ruido debido a la implosión (colapso) de las cavidades en el interior del flujo y cerca de las paredes sólidas.
- 3- Erosión de las superficies sólidas cuando los colapsos se producen sobre ellas independientemente del tipo de material y dureza.

Consecuencias:

- 1- Disminución del rendimiento hidráulico de las máquinas.
Errores de medida, por ejemplo en cabalímetros.
- 2- Limitación del funcionamiento debido a niveles inadmisibles.
Generación de daños en cuerpos o instalaciones por fuerzas repetitivas sobre estructuras o componentes resultando en fatiga.
- 3- Destrucción total o parcial de componentes de las máquinas (fugas, mal funcionamiento,...).

2.3.8.4. Lugares de posible aparición

- Flujo alrededor de cuerpos sumergidos en un fluido. Cuerpos fijos o en movimiento.
- Flujo en conductos en zonas donde la velocidad local es de magnitud importante. Venturi, válvulas, ...
- Flujo con cizallamiento. Estela, rayo, ...
- Flujo con vorticidad. Longitudinal y transversal.
- Flujo en el interior de máquinas hidráulicas

2.3.8.5. Coeficiente sigma (σ)

El coeficiente sigma (σ) es un parámetro adimensional muy usado en la mecánica de fluidos cuando existen flujos con cavitación.

Se calcula como:

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_{vap}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

Siendo P_{ref} y P_{vap} las presiones de referencia y vapor, ρ la densidad y v la velocidad.

2.4. Perfil alar, sus partes y otros conceptos del ala

Tanto la forma como la inclinación del perfil de una ala respecto a la dirección de la corriente del fluido son de gran importancia en la distribución de las presiones alrededor del cuerpo, ya que son las que dan origen a la sustentación del mismo.

Seguidamente, se definen algunos conceptos básicos en cuanto a la terminología de las diferentes partes que componen un perfil alar:

- Extradós: parte superior del perfil (cara de succión).
- Intradós: parte inferior del perfil (cara de presión).
- Borde de ataque: es el lugar del perfil que primero contactará con el fluido. Es también el que distribuirá la corriente, separándola en extradós e intradós.
- Borde de salida: es el lugar del perfil por donde sale el aire, y desde el que la corriente debería de volver a juntarse.
- Cuerda c: es la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida.
- Espesor h: es el grosor del perfil en un punto, es decir, la distancia entre el extradós y el intradós.
- Anchura b: es la distancia perpendicular al perfil.
- Perfil asimétrico: es el perfil en el que el extradós es diferente al intradós.
- Perfil simétrico: es el perfil en el que el extradós y el intradós son iguales.
- Ángulo de ataque: es el ángulo que existe entre la cuerda del perfil y la dirección de la corriente de aire.
- C_p : coeficiente de presión.
- C_L y C_D : coeficientes de sustentación (lift) y de arrastre (drag), característicos de un perfil para unas condiciones dadas.

En la siguiente figura 2.4.1 se pueden observar muchos de los aspectos que se acaban de definir.

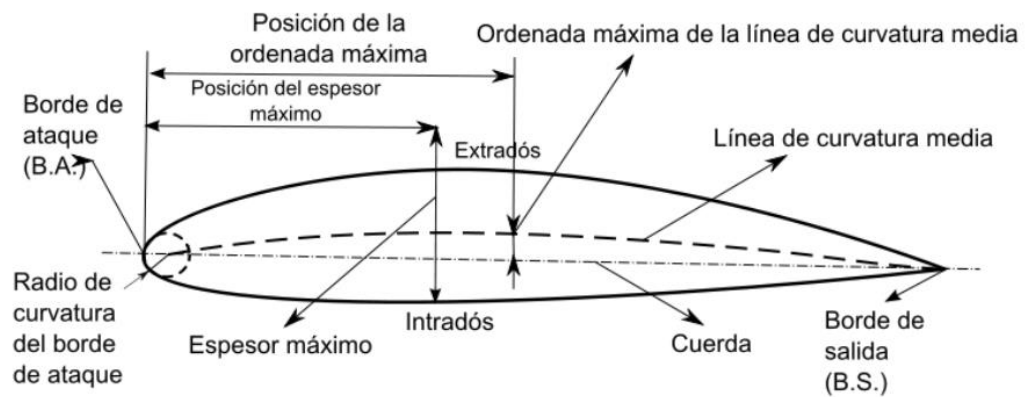


Figura 2.4.1. Perfil Alar y sus partes

2.5. Nomenclatura de los perfiles NACA

Hasta hace muy poco tiempo, la investigación y desarrollo de perfiles alares se daba de forma totalmente empírica. Se tenía claro desde un principio que en un perfil alar lo más recomendable era tener un borde de ataque redondeado y uno de salida fino. El gran incremento en cuanto a la demanda de secciones lo más perfectas posibles en el sector aeronáutico y la carencia de una teoría general propiciaron la aparición de los perfiles NACA.

Los perfiles NACA fueron creados por la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), NASA en la actualidad. Resultaron de una serie de experimentos realizados con el fin de encontrar distintos tipos de perfiles para dar con el modelo más adecuado y eficiente. De este modo, los perfiles NACA pretendían ser una normalización, regulación y estandarización para clasificar los distintos perfiles de los estudios realizados.

Así pues, se estableció una nomenclatura especial que permitiera poder diferenciar unos perfiles de otros y que además de su propio nombre se pudieran deducir las características geométricas típicas de cada perfil.

Para calcular los distintos puntos que conforman un perfil NACA, se estableció la siguiente expresión estándar para todos los casos:

$$\frac{y}{c} = \pm \frac{t}{0,2} \left(0,2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0,1260 \frac{x}{c} - 0,3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right)$$

Dónde, c es la longitud correspondiente a la cuerda del perfil, y corresponde al valor de

altura del intradós (-) o extradós (+) para un valor cualquiera de la coordenada x que representa la posición yendo desde 0 hasta c (longitud de la cuerda). Por último, t representa la fracción entre el grosor máximo del perfil y la longitud de la cuerda.

En nuestro caso nos centramos en el estudio de un perfil hidrodinámico NACA 0009.

Como se ha comentado anteriormente, de su nomenclatura obtenemos información sobre su geometría. El hecho de que los primeros dos dígitos sean iguales y ceros (00), nos está diciendo según la normativa NACA, que nos encontramos ante un perfil simétrico. El resto de números en este caso hacen referencia al máximo espesor con relación a la cuerda, que en nuestro caso es de un 9% (09).

En la siguiente figura se muestra el perfil objeto del estudio de este trabajo:

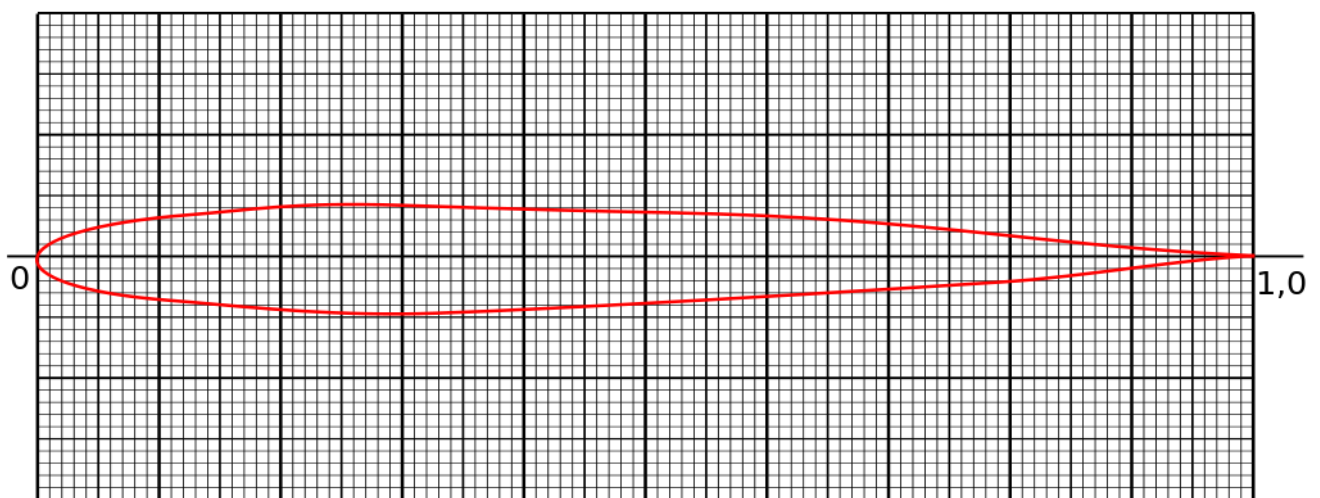


Figura 2.5.1 Perfil alar NACA 0009

2.6. Fuerzas Aerodinámicas

Sobre un perfil alar actúan una serie de fuerzas, favorables unas y desfavorables otras, siendo una tarea primordial ejercer control sobre ellas para mantener el objeto en el posicionamiento deseado. El origen de dichas fuerzas son las presiones y las tensiones que actúan a lo largo de la superficie.

En el diseño todo perfil aerodinámico sustentador se pretende maximizar las presiones. La representación de las presiones se suele llevar a cabo mediante el coeficiente de presiones (C_p).

El coeficiente de presión, es por tanto un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo. Se calcula siguiendo la siguiente fórmula:

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

Dónde:

- P : presión en el punto x obtenida mediante Ansys (es diferente para cada valor de x).
- P_{ref} : Presión de referencia (no cambia en función de x , es característica de cada σ).
- ρ : es la densidad del agua a 16 °C (999,03 kg/m³).
- v : es la velocidad del fluido (15 m/s).

Así pues, cuando tenemos un fluido que pasa a través de un ala, las partículas de fluido se ven obligadas estrecharse en la parte superior del perfil (extradós), mientras que las partículas que viajan por la parte inferior del perfil (intradós) tienden a ensancharse. Esto conlleva a que en el extradós la velocidad aumente y la presión disminuya. Por el contrario, en el intradós, la velocidad disminuye y la presión aumenta. Esas dos presiones que aparecen sobre el ala crean una fuerza en el sentido positivo (opuesto al de la gravedad) ya que las partículas que pasan por debajo empujan hacia arriba el ala, y las partículas que pasan por encima succionan el ala también hacia arriba.

El paso de una corriente a través de un perfil, alar en nuestro caso, produce una fuerza llamada fuerza aerodinámica, que se obtiene a partir de la composición de dos fuerzas ya mencionadas anteriormente: Sustentación (Lift) y Resistencia al avance (Drag).

La sustentación es la componente que resulta perpendicular a la corriente libre de fluido. Se formula mediante la siguiente ecuación:

- *Sustentación (Lift)*: Fuerza generada en dirección perpendicular a la velocidad del corriente incidente.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L$$

Dónde, ρ es la densidad en kg/m³, v es la velocidad en m/s, A es la sección en m² y C_L es el coeficiente de sustentación.

El C_L (coeficiente de sustentación) es un parámetro adimensional que relaciona la F_L (Fuerza de sustentación) con la densidad y la velocidad característica del fluido que pasa

por una determinada sección. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Siendo:

- F_L : Fuerza de sustentación.
- ρ : Densidad del fluido
- v : Velocidad del fluido
- A : Sección. $A = b \cdot c$, donde b es la anchura del perfil alar y c es la longitud de la cuerda.

La resistencia al avance, D , es la componente que resulta paralela a la dirección del fluido. Se formula mediante la siguiente ecuación:

- *Resistencia al avance (Drag)*: Fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del fluido en particular. La resistencia es siempre de sentido opuesto al de la velocidad y de igual dirección. En el caso en que el fluido es agua se le denomina resistencia hidrodinámica.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D$$

Dónde, ρ es la densidad en kg/m^3 , v es la velocidad en m/s , A es la sección en m^2 y C_D es el coeficiente de sustentación.

El C_D (coeficiente de resistencia al avance) es un parámetro adimensional que relaciona la F_D (Fuerza de resistencia al avance) con la densidad y la velocidad característica del fluido que pasa por una determinada sección.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Siendo:

- F_D : Fuerza de resistencia al avance.
- ρ : Densidad del fluido
- v : Velocidad del fluido
- A : Sección. $A = b \cdot c$, donde b es la anchura del perfil alar y c es la longitud de la cuerda.

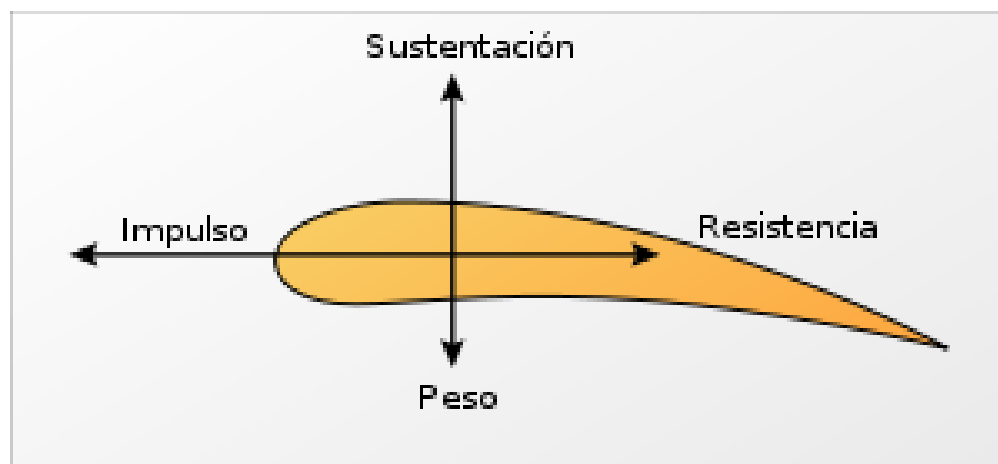


Figura 2.6.1 Fuerzas aerodinámicas

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

Este proyecto consiste en la realización de una serie de simulaciones con computador de un flujo de agua alrededor de un perfil hidrodinámico NACA 0009. En primer lugar, se pretende contrastar los resultados obtenidos mediante las simulaciones con una serie de resultados experimentales disponibles y así poder verificar que las simulaciones reproducen fielmente el fenómeno físico real. En segundo lugar, a partir de los resultados obtenidos se realizará un estudio de algunos de los parámetros fluidodinámicos que caracterizan el fenómeno físico en cuestión.

Concretamente, nuestro caso consiste en una simulación de un flujo complejo de dos fases, líquido-gas, ya que se somete a condiciones de cavitación. Mediante este proyecto, se pretende poder simular dicha cavitación y estudiar su evolución a medida que se va disminuyendo el valor del coeficiente de cavitación sigma, σ . A partir de las simulaciones se quieren extraer los datos característicos del fenómeno y analizarlos para sacar conclusiones de la influencia de σ sobre la cavitación.

Para alcanzar los objetivos se ha empezado con casos preliminares básicos y a partir de aquí se ha ido ampliando hasta llegar al caso real objeto de estudio.

3.2. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto consiste en poder llegar a simular mediante un programa de simulación numérica (Ansys) el paso de un fluido (agua) alrededor de un perfil hidrodinámico NACA 0009 bajo condiciones de cavitación.

Se pretende hacer una primera simulación en la que no haya cavitación con el fin de ver el comportamiento del fluido en condiciones normales y para que sirva como iteración inicial de las siguientes simulaciones en las que se activará el módulo de cavitación y se irá bajando la presión paulatinamente hasta llegar a valores de presión de vapor, manteniendo el resto de parámetros constantes.

Una vez hechas las simulaciones se analizarán los resultados más relevantes y se compararán con los obtenidos en los experimentos realizados en *l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* de Suiza.

3.3. CFD (Dinámica Computacional de Fluidos)

A lo largo de la historia, los problemas relacionados con la mecánica de fluidos, se estudiaban mediante dos técnicas complementarias: el estudio teórico y experimental.

No fue hasta el siglo XXI cuando gracias a la aparición de los primeros ordenadores, con suficiente capacidad de memoria y procesamiento, dio pie a la creación de nuevas formas de estudio del comportamiento de los fluidos que comportaron grandes ventajas y resultados ampliamente satisfactorios.

El estudio experimental propiamente dicho empezó en el siglo XVII en Francia e Inglaterra. Durante los siguientes siglos XVIII y XIX se desarrolló el estudio teórico de la dinámica de fluidos. Por esta razón, durante la mayor parte del siglo XX, los estudios realizados sobre dinámica de fluidos se basaban en estudios puramente experimentales por un lado, y puramente teóricos por el otro.

Sin embargo, como ya se ha mencionado con anterioridad, la aparición de computadoras capaces de procesar y trabajar con una gran cantidad de datos y ecuaciones, y el gran desarrollo de sistemas algorítmicos precisos capaces de resolver problemas físicos fueron el origen de una revolución en la manera en que estudiamos hoy en día la dinámica de fluidos.

De todo esto se deriva el nacimiento de un nuevo método de estudio y análisis que complementa a los métodos ya existentes (teóricos y experimentales). Así pues, este nuevo sistema de estudio del comportamiento de los fluidos se conoce como *Dinámica Computacional de Fluidos* o *CFD*.

De este modo, la *Dinámica Computacional de Fluidos*, o *CFD*, se define como la rama de la mecánica de fluidos que se basa en el uso de ordenadores o computadoras para la resolución de problemas mediante la simulación numérica.

Hay que tener en cuenta que se trata de un modo de afrontar un problema completamente distinto a los usados con anterioridad. Sin embargo, resulta importante saber que todo y el gran potencial y utilidad que ofrece la *Dinámica Computacional de Fluidos* no significa que mediante el uso de esta técnica deban dejarse a un lado las otras dos formas de estudio empleadas hasta el momento.

El CFD nunca podrá reemplazar al estudio teórico y experimental, y de hecho puede existir un error de hasta un 20% respecto a los estudios experimentales. Por consiguiente, un estudio completo de un problema en concreto es aquel que consigue reunir los tres métodos de estudio y conseguir que se complementen a la perfección. Los resultados que se obtienen mediante el CFD son una predicción de los resultados reales que debe ser comprobada con la observación de la realidad.

3.3.1. Simulaciones CFD vs experimentación

Las simulaciones mediante CFD permiten poder simular y estudiar el comportamiento de flujos complicados, costosos o prácticamente imposibles de estudiar mediante técnicas de experimentación tradicionales. Seguidamente, se muestran las diferencias básicas existentes entre la simulación mediante CFD y la experimentación tradicional.

- Experimentación: Descripción cuantitativa del comportamiento de un flujo mediante medidas tomadas. Características:
 - Caro.
 - Lento.
 - Secuencial.
 - Un único propósito.
 - Ha de hacerse de uno en uno.
 - Equipo y personal difícil de mover.
 - Número limitado de puntos e instantes de tiempo.
 - Para un modelo de laboratorio, a escala (prototipos).
 - Número limitado de condiciones de funcionamiento y problemas.

Posibles errores: errores de medición, distorsiones en el flujo debido a las pruebas.

- Simulación: Predicción cuantitativa del comportamiento de un flujo mediante el uso de un software de CFD. Características:
 - Más barato.
 - Más rápido.
 - Se puede hacer en paralelo.
 - Propósitos múltiples
 - Equipo portátil, fácil de mover.
 - Cantidad de información a analizar ilimitada.
 - Gran resolución en tiempo y espacio.
 - Se simula el dominio real.
 - Para cualquier número de problemas y condiciones de funcionamiento.

Posibles errores: Modelando, discretizando, iterando o implementando el modelo a estudiar.

Como ya hemos mencionado en el apartado anterior, los resultados obtenidos mediante CFD nunca son 100% fiables. Esto puede ser debido a varios motivos:

Los datos de entrada para la simulación pueden no ser suficientes en cantidad y precisión. Esto puede implicar imprecisión o dejar muchos

- aspectos al azar.
- El modelo matemático del problema en cuestión puede no ser suficiente para resolverlo.
- La exactitud de los resultados está limitada por el número de recursos disponibles (dinero, potencia del equipo, tiempo,...) para la simulación.

Por último, cabe mencionar que como norma general la simulación nunca reemplazará la experimentación tradicional, pero sí que puede servir de una gran ayuda y disminuir los costes globales significativamente.

4. Estudio de la cavitación sobre un perfil NACA 0009

4.1. Simulaciones preliminares

Antes de empezar con el proyecto propiamente dicho, se realizaron una serie de simulaciones preliminares con el fin de aprender el funcionamiento del *Workbench* del programa *Ansys* de fluidos y practicar con casos similares al caso de estudio.

Por una parte, se hizo un tutorial sobre la simulación de un flujo de aire alrededor de un perfil alar NACA 0012 con el objetivo de aprender a modelar un fluido externo bajo diferentes condiciones.

La simulación consistía en importar tanto la geometría como la malla del dominio de estudio que contiene el perfil alar NACA 0012. Una vez importado el dominio de estudio, el tutorial muestra cómo se tienen que imponer las distintas condiciones de contorno, propiedades del fluido, ángulo de ataque del ala,... en el Setup de *Ansys* con el fin de poder desarrollar la simulación deseada correctamente. También se enseña a activar y manipular el Post proceso para obtener aquellos resultados de la simulación que interesa estudiar.

Por otra parte, se procedió con la realización de otro tutorial, pero esta vez relacionado con el fenómeno de cavitación en una máquina hidráulica. En el mismo, se mostraban las condiciones que se deben activar para poder simular mediante *Ansys* la coexistencia de dos fases (líquido y gas). Por lo tanto, se muestra como debe ser la simulación del fenómeno de la cavitación si se dan las condiciones adecuadas para que éste se produzca.

Ambos tutoriales han servido como fuente de aprendizaje y prueba previos al desarrollo de este trabajo.

4.2. Geometría NACA 0009

4.2.1. Antecedentes

Para realizar la geometría se ha partido de un fichero con un listado de puntos correspondientes a las coordenadas de un perfil NACA 0009 truncado en su borde de

salida.

Sin embargo, cabe mencionar que en este proyecto se ha trabajado con la geometría completa por dos motivos en especial:

- Facilitar la realización del mallado. La geometría cortada por el final presenta mayor dificultad en cuanto al mallado que la geometría alar convencional. Esto se debe a que en la que está cortada, por la zona del corte, las curvas no resultan ser suaves sino todo lo contrario ya que presentan cambios bruscos de dirección cosa que dificulta mucho el mallado y obliga a refinar mucho la malla en esa zona para poder obtener un buen resultado.
- Evitar la formación de vórtices de Von Karman en la estela del perfil.

4.2.2. Definición de la geometría

Una vez decidida la geometría que se usaría para el estudio, se presentaba el problema de definir los puntos geométricos que no constaban en el fichero como se ha mencionado anteriormente y evidentemente añadirlos para poder así dibujar la geometría completa.

Este problema se solucionó importando el listado de puntos obtenido al programa de CAD SolidWorks.

Una vez importados los puntos, lo primero que se hizo fue mediante curvas (*splines*) ir uniendo cada uno de los puntos y borrar todos aquellos que no se deseaban, es decir, la parte correspondiente al corte del final.

De este modo, se consiguió obtener la geometría continua de todo el perfil alar exceptuando el último tramo que se añadió realizando una recta tangente a la curva y que pasara por el último de los puntos que disponíamos. Esta operación se realizó dos veces para obtener la curva correspondiente a la parte superior (extradós) y a la parte inferior (intradós).

Todos los puntos del perfil obedecen la ecuación:

$$\frac{y}{c} = \pm \frac{t}{0,2} \left(0,2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0,1260 \frac{x}{c} - 0,3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right)$$

Siendo c (cuerda) = 111,69 mm.

Finalmente, como se ve en la siguiente figura, se ha obtenido la geometría que será objeto de estudio.

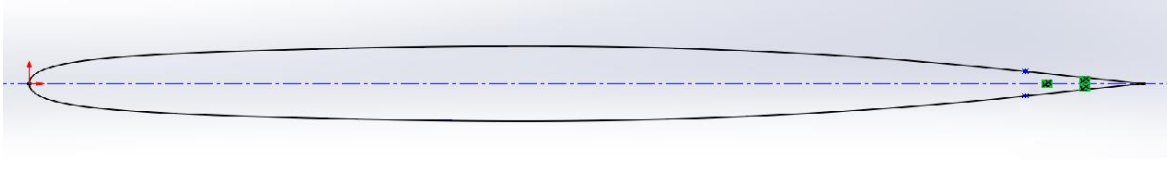


Figura 4.2.1 Geometría NACA 0009 con SolidWorks

4.3. Dominio de estudio

Una vez definida la geometría es importante saber definir un dominio de estudio adecuado con el fin de obtener resultados correctos al hacer la simulación.

El dominio de estudio en CFD se define como la región por la cual pasa el fluido que es objeto de estudio.

En el caso de este trabajo el dominio de estudio resulta ser el área comprendida entre el perfil alar NACA 0009 y unas líneas de contorno exteriores (inlet y outlet) definidas por nosotros con la forma que se ve en la siguiente figura.

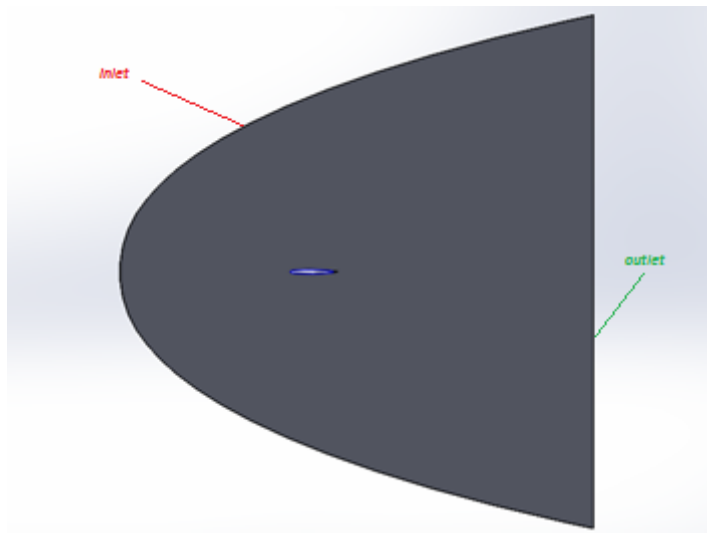


Figura 4.3.1 Dominio de estudio

El dominio de estudio no es el mismo que el que se usó experimentalmente. En este proyecto, con el fin de simplificar el problema y los cálculos de simulación, se ha usado esta forma para poder evitar tener que poner paredes exteriores en la parte superior e inferior ya

que al cambiar el ángulo del fluido nos podrían dar problemas de falta de paralelismo. Por tanto, podemos decir que se ha optado por el uso de un dominio prácticamente infinito.

4.4. Mallado

La realización de un mallado adecuado es una de las claves en toda simulación mediante computador. Es importante antes de nada hacerse una idea previa de que va a suceder durante la simulación, cuáles van a ser las zonas críticas, que zonas son las que van a tener más interés y repercusión en nuestro estudio,... ya que todo esto va a ser lo que va a condicionar y determinar el tipo de mallado óptimo para el estudio en cuestión y por tanto, una buena previsión nos va a facilitar y agilizar el trabajo.

Para poder obtener unos resultados fiables y precisos es imprescindible que el mallado sea el adecuado en todos y cada uno de los puntos del dominio de estudio. De este modo, no sólo conseguiremos mucha más precisión en aquellos lugares donde deseemos, sino que además ganaremos en tiempo y recursos utilizados ya que nos ahorraremos mallado en aquellas zonas donde los resultados sean previsibles o simplemente carezcan de interés en el estudio.

También es importante conocer que no por aumentar el número de nodos, el mallado va a ser mejor y más preciso. Existe un cierto punto a partir del cual por mucho que se aumente el número de nodos la precisión se estanca o aumenta tan poco que no vale la pena. De este modo, vemos una vez más la importancia de hacer un buen mallado.

Así pues, en el caso que concierne a este trabajo se han seguido las pautas explicadas con anterioridad con el fin de realizar el mallado idóneo para poder obtener resultados precisos en todas aquellas zonas que se deseen.

4.4.1. Mallado del dominio de estudio

En nuestro caso se ha optado por realizar un mallado progresivo. Es decir, la amplitud de los elementos va disminuyendo desde el contorno externo del dominio (inlet y outlet) hasta el perfil alar (NACA 0009) a estudiar. Sin embargo, el número de nodos va aumentando a medida que nos acercamos al perfil alar como era de prever ya que cada vez los elementos se van haciendo más pequeños.

Todo esto se debe a que queremos tener una mayor precisión a medida que estemos más cerca del objeto, ya que es allí donde se producen las distintas perturbaciones sobre el

fluido que queremos analizar. Además, una vez estamos muy alejados el fluido se comporta de un modo prácticamente constante ya que no se ve afectado por la presencia del objeto en cuestión y por tanto estas zonas carecen de importancia relevante y es por ello que no necesitan un mallado fino.

Por otra parte, resulta también muy interesante saber con gran exactitud qué es lo que sucede en la capa límite y sus alrededores. Por tanto, se ha decidido refinar la malla en todo el contorno del perfil alar, dando así mucha mayor precisión a los resultados obtenidos en las regiones donde se sitúa la capa límite.

En las siguientes figuras, de la 4.4.1.1 a la 4.4.1.4, se puede ver el mallado realizado y se muestra de manera clara los aspectos mencionados con anterioridad.

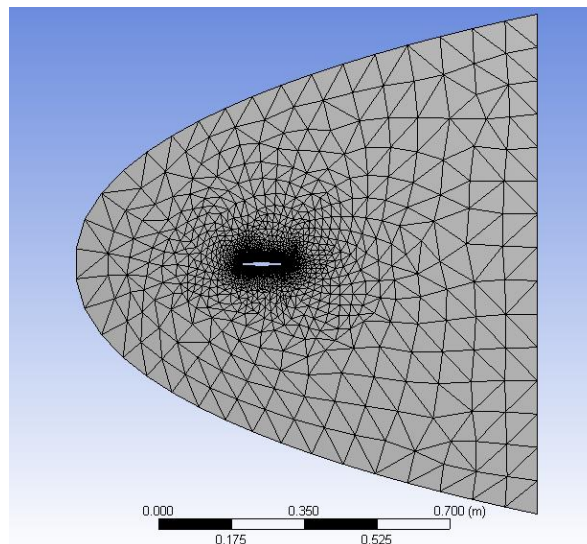


Figura 4.4.1.1

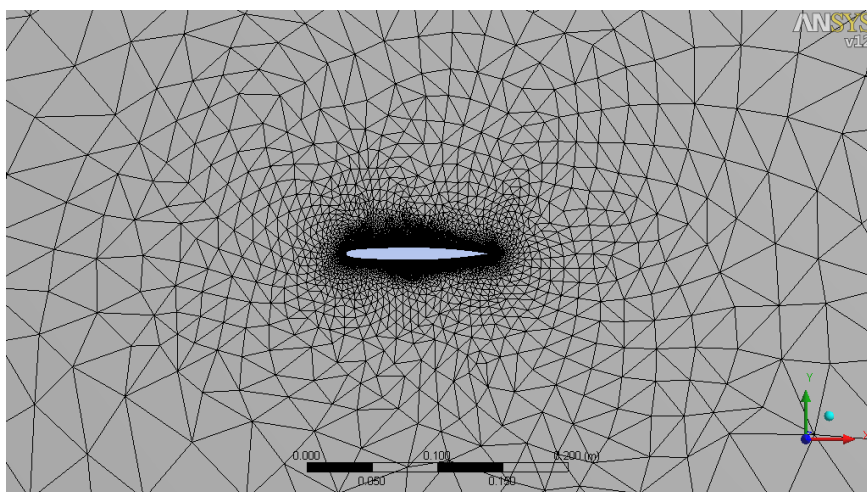


Figura 4.4.1.2

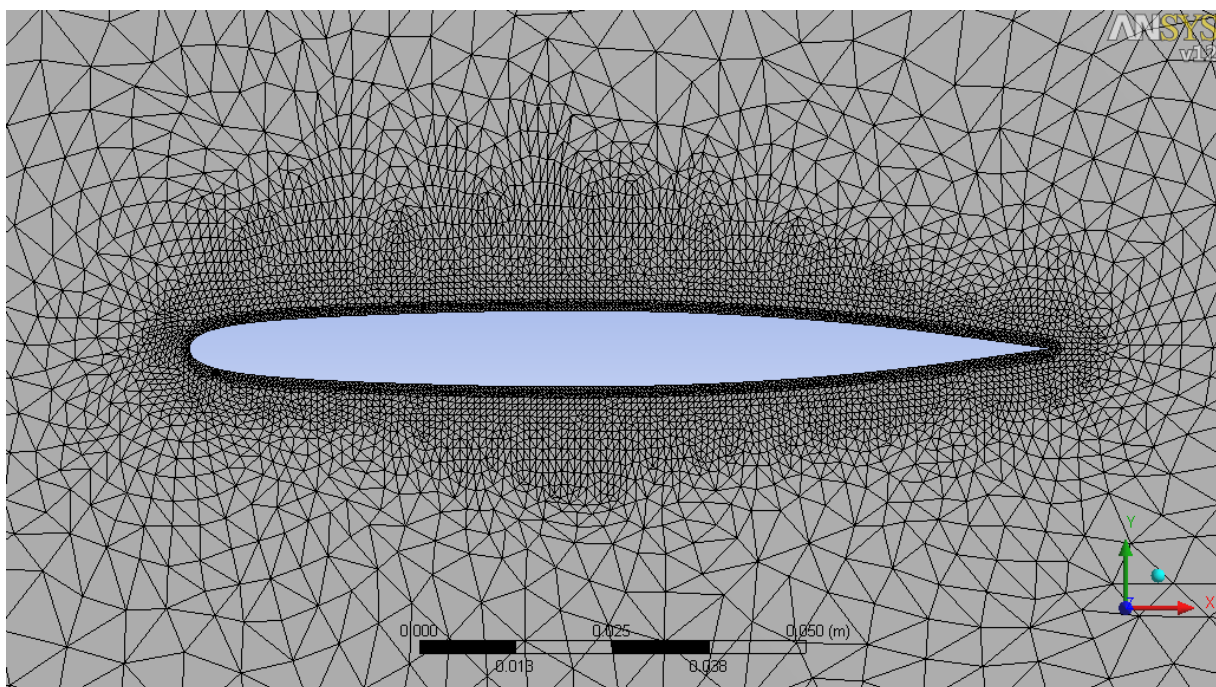


Figura 4.4.1.3

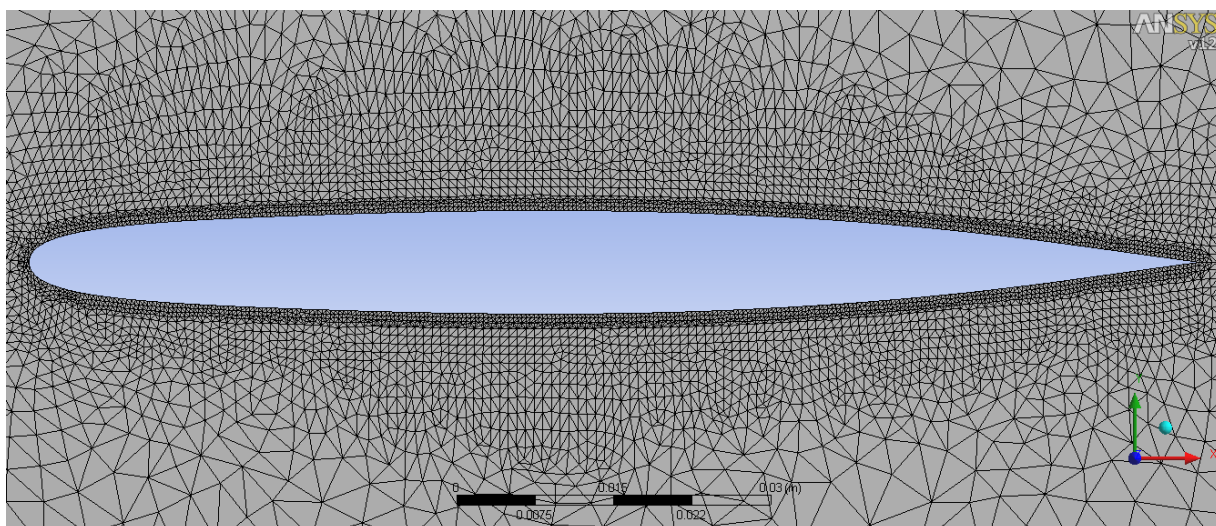


Figura 4.4.1.4

4.5. Parámetros de la simulación

Una vez importada la geometría y creada la malla en Ansys, se ha procedido a establecer los parámetros de simulación en el modelo.

Case Set Up

- Condiciones de contorno para un modelo sin cavitación:
 - Material: Agua
 - Morfología: Fluido Continuo
 - Presión de referencia: 1 atm
 - Isotermo: 16 °C $\rightarrow \rho_{\text{agua}(16^{\circ}\text{C})}=999,03 \text{ kg/m}^3$.
 - Turbulencia: SST (*'Sher Stress Transpot'*). Se trata de un modelo muy robusto de turbulencia comúnmente utilizado en la mecánica de fluidos. Usa dos ecuaciones, una para la capa límite y otra para el flujo de cizallamiento libre.
 - Ángulo de ataque: 1°. En vez de inclinar el perfil para obtener el ángulo de incidencia deseado, se ha optado por inclinar el flujo ya que resultaba más fácil y los resultados son los mismos de ambas formas.
 - Velocidad del flujo: 15 m/s (en dirección x).
 - Airfoil: Es el contorno del perfil alar NACA 0009. Se le ha aplicado la condición de contorno de: Tipo pared (a la parte superior e inferior).
 - Inlet: Parte por donde entra el flujo al dominio.
 - Outlet: Parte por donde sale el flujo del dominio.
 - Presión relativa: 0 Pa.
 - Simetría: Son las dos caras del dominio. Es decir, la cara frontal y la posterior.

- Condiciones de contorno para un modelo con cavitación:

Para realizar una simulación con el módulo de cavitación activado se mantienen todos los parámetros anteriores y además se cambian o añaden los siguientes:

- Editar el modelo: Activar la opción de modelo para par de fluidos.
- Seleccionar los fluidos que deseamos: Agua y Aire.
- Activar el *Rayleigh-Plesset* (ecuación que gobierna la dinámica de las burbujas en un dominio infinito de líquido). Establecer el diámetro medio

de la zona de nucleación al valor razonable de $2 \cdot 10^{-6}$ m.

- Presión de saturación o presión de vapor (agua a 16 °C): 1818,8 Pa.
- Presión relativa: Es un valor que irá cambiando en cada simulación en función del valor que le queramos dar al número adimensional σ . Véase el proceso para calcular la Presión relativa correspondiente a cada σ :

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_{vap}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

$$P_{ref (absoluta)} = \sigma \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \right) + P_{vap}$$

$$P_{ref (relativa)} = P_{ref (absoluta)} - 100000$$

- Por último, hay que enlazar el modelo sin cavitación con el modelo con cavitación, de tal forma que la simulación sin cavitación sirva de iteración inicial para la simulación con cavitación.

4.6. Puntos de monitorización

Son aquellos puntos que se definen en el modelo previamente a solucionarlo para poder medir algún parámetro del fluido de estudio en un punto en concreto (presión, velocidad,...) o calcular algún parámetro del fluido mediante su fórmula (C_p , C_D , C_L ,...).

En nuestro caso, se han definido dos puntos de monitorización para todas las simulaciones. Estos puntos se han definido para poder comprobar que el comportamiento del fluido durante la simulación era el adecuado. Por ello, se situaron los puntos de monitorización en zonas del dominio donde se podía prever de antemano cual iba a ser el comportamiento del fluido.

De este modo, se ha definido un punto para medir la velocidad del fluido (Punto 4) y otra para medir la presión absoluta (Punto 1). Véase en la siguiente figura los puntos utilizados y la posición de cada uno de ellos.

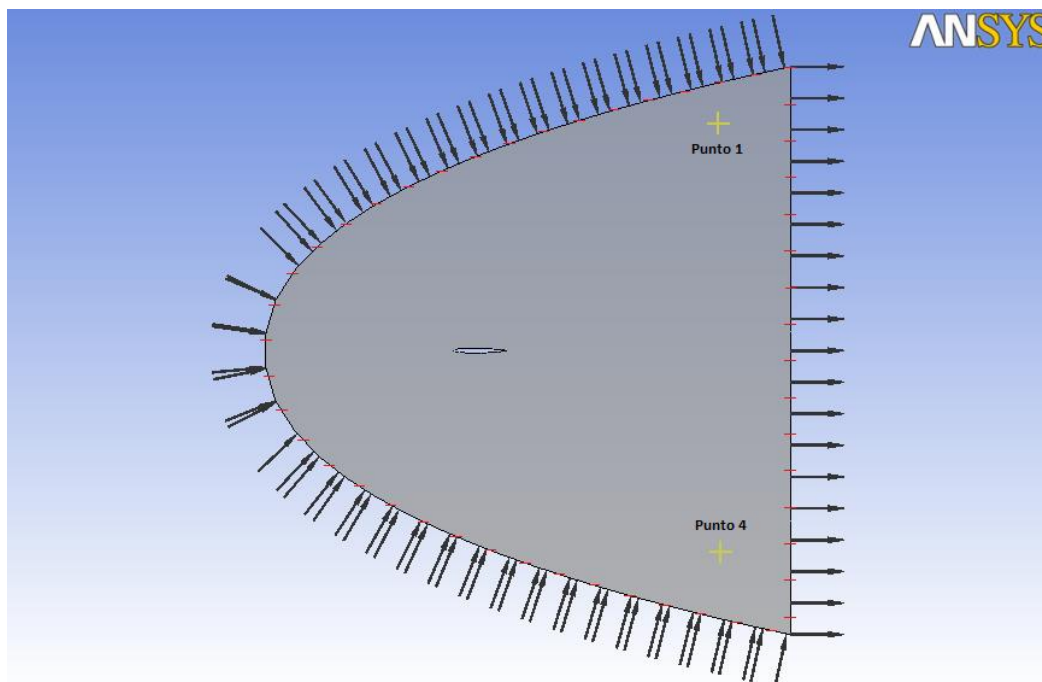


Figura 4.6.1 Puntos de Monitorización

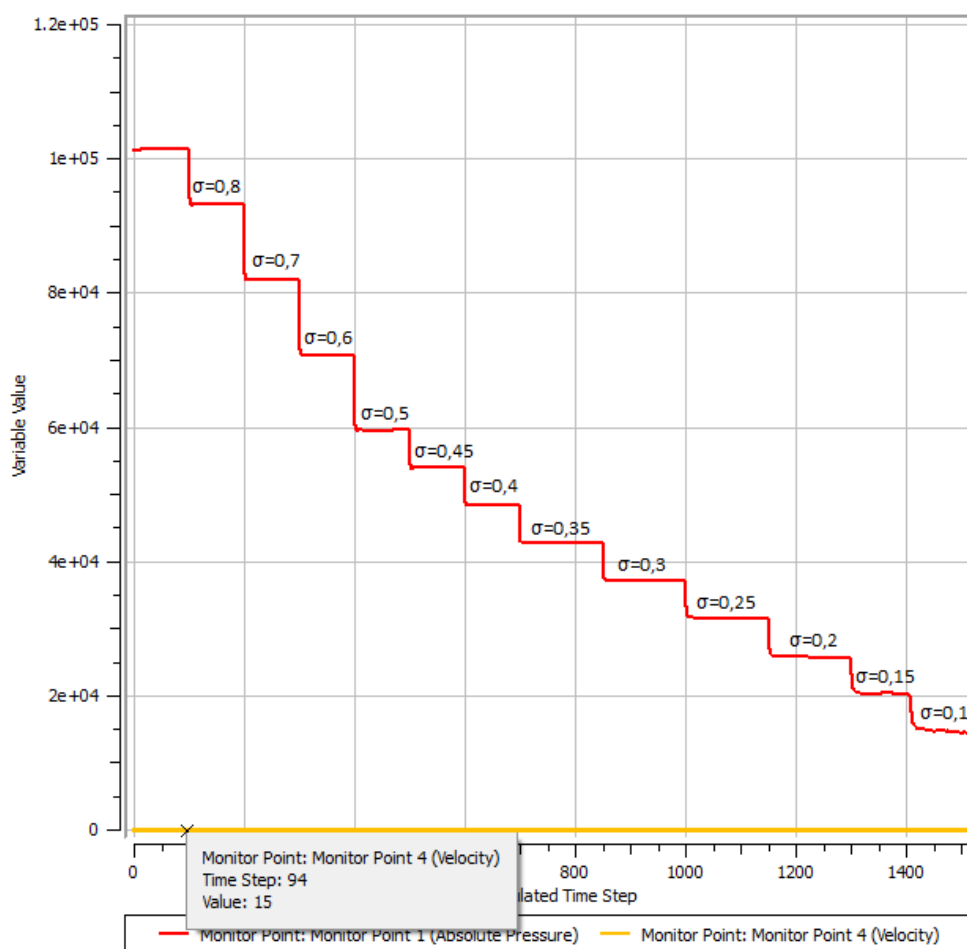


Figura 4.6.2 Valor de los puntos de monitorización

La figura anterior muestra el valor de los puntos de monitorización para cada una de las simulaciones realizadas.

En la figura anterior se ve como el valor del punto de monitorización 4 (velocidad) tiene un valor de 15 m/s constante durante todas las iteraciones realizadas. Este hecho era de esperar ya que se trata de un punto alejado del perfil alar y por tanto, el fluido no se ve afectado por la presencia del ala en ese punto.

En cuanto a la presión absoluta se ve claramente la disminución de la misma a la vez que vamos disminuyendo el valor de σ . En la siguiente tabla, se muestran los valores de la presión absoluta calculados de forma teórica y mediante la simulación para cada valor de σ .

σ	P_{abs} Teórica (Pa)	P_{abs} Simulación (Pa)	% Diferencia
0,8	91731,5	91739	0,01
0,7	80492,4	80494	0,00
0,6	69253,3	69271	0,03
0,5	58014,2	58123	0,19
0,45	52394,7	52507	0,21
0,4	46775,2	46789	0,05
0,35	41155,6	41164	0,31
0,3	35536,1	35558	0,17
0,25	29916,5	30006	0,30
0,2	24297,0	24503	0,85
0,15	18677,4	18690	0,60
0,1	13057,9	13268	0,77

Tabla 4.6.1

Como vemos en todos los casos el valor de la presión absoluta de la simulación coincide prácticamente con el valor esperado teóricamente. Existen diferencias entre ambos valores que no llegan ni al 1 %.

Por tanto, vemos que analizando los dos puntos de monitorización escogidos los resultados

de la simulación han resultado ser los mismos que se habían previsto teóricamente. Así pues, podemos afirmar que la simulación realizada se ajusta bien al fenómeno estudiado.

4.7. Análisis de los residuos

- Control de la convergencia:
 - RMS: Criterio de convergencia de residuos.
 - Número de iteraciones:
 - Mínimo: 100
 - Máximo: 1000

En la siguiente figura se pueden observar los residuos obtenidos durante todas las simulaciones realizadas.

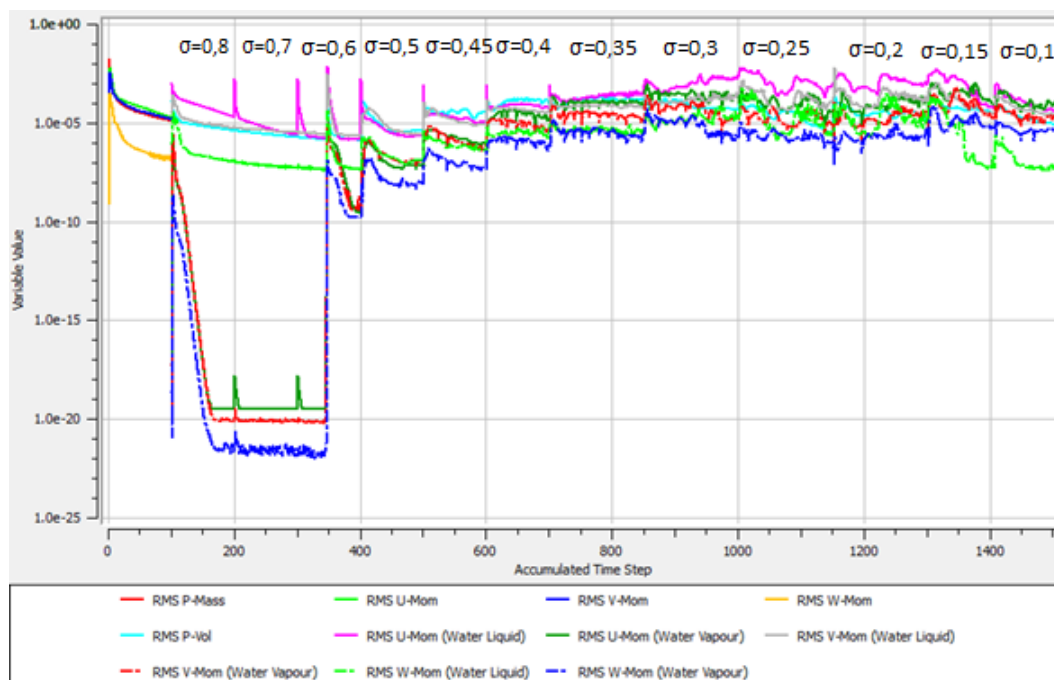


Figura 3.8.1 Residuos

Como se observa en la figura 3.8.1, para valores de σ altos la solución converge rápidamente, en cambio al ir disminuyendo el valor de σ y aparecer la cavitación, cada vez les cuesta más convergir a los residuos.

Si hiciéramos un zoom en la imagen anterior veríamos como a partir de la zona dónde empieza a aparecer el fenómeno de la cavitación, aparece una pequeña oscilación de los residuos ya que nos encontramos en una zona inestable.

4.8. Resultados de las simulaciones

El objetivo principal de este proyecto era conseguir que apareciera el fenómeno de la cavitación sobre un perfil alar NACA 0009 sumergido en agua en las condiciones explicadas en el apartado 4.5.

Así pues, para conseguir la aparición de dicho fenómeno y poder analizarlo posteriormente, se han realizado 12 simulaciones con Ansys.

Primeramente, se ha realizado una simulación inicial sin el módulo de cavitación activado. Los resultados de la misma se han usado como iteración inicial para la primera simulación con el módulo de cavitación activado.

Finalmente, se pasó a activar el módulo de cavitación para poder ver si se producía el fenómeno en cuestión.

El procedimiento seguido para hacer las simulaciones ha consistido en ir bajando poco a poco la presión (asociada a un valor de σ determinado) hasta niveles por debajo de la presión de vapor (cuando aparece la cavitación) y ver que sucedía sobre perfil alar NACA 0009.

En los siguientes apartados se muestran para cada simulación realizada los resultados que se ha creído que son más interesantes y relevantes para poder analizar satisfactoriamente el fenómeno objeto de estudio de este proyecto.

4.8.1. Fracción de volumen

En las figuras que se observan a continuación, se puede ver la representación de la fracción de vapor de agua presente en el dominio de estudio.

Siguiendo la escala de colores que se encuentra a la izquierda de las imágenes, se ve como el color azul representa que el fluido es completamente líquido en esa zona (fracción de vapor ≈ 0). Por su parte, el color rojo representa que el fluido se encuentra en forma de vapor en esa zona (fracción de vapor ≈ 1). El resto de colores se refieren a estados intermedios en los que coexisten agua y vapor de agua.

Mediante esta escala de colores se puede observar perfectamente la aparición y crecimiento de la cavitación al ir bajando la presión hasta llegar a niveles de presión de vapor ($P \leq P_{\text{vap}}$).

Véase todo lo que se acaba de comentar en las siguientes figuras:

$$\sigma = 0,8$$

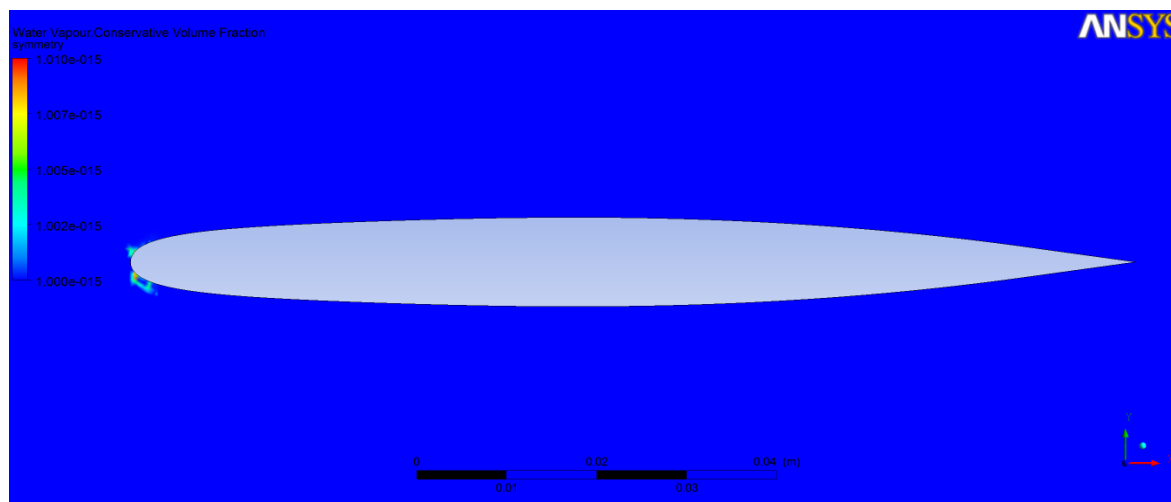


Figura 4.8.1.1

$$\sigma = 0,7$$

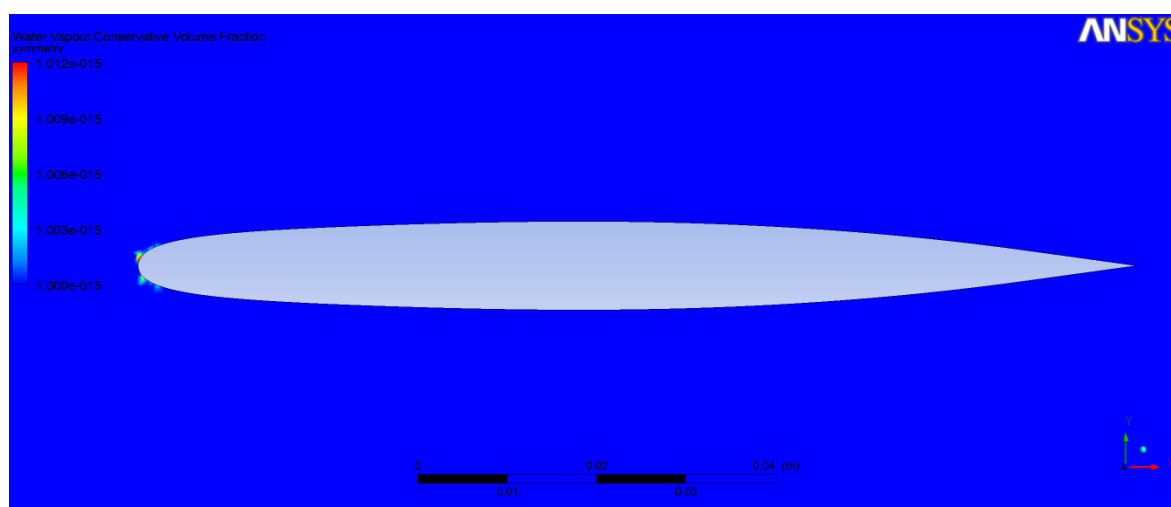


Figura 4.8.1.2

$$\sigma = 0,6$$

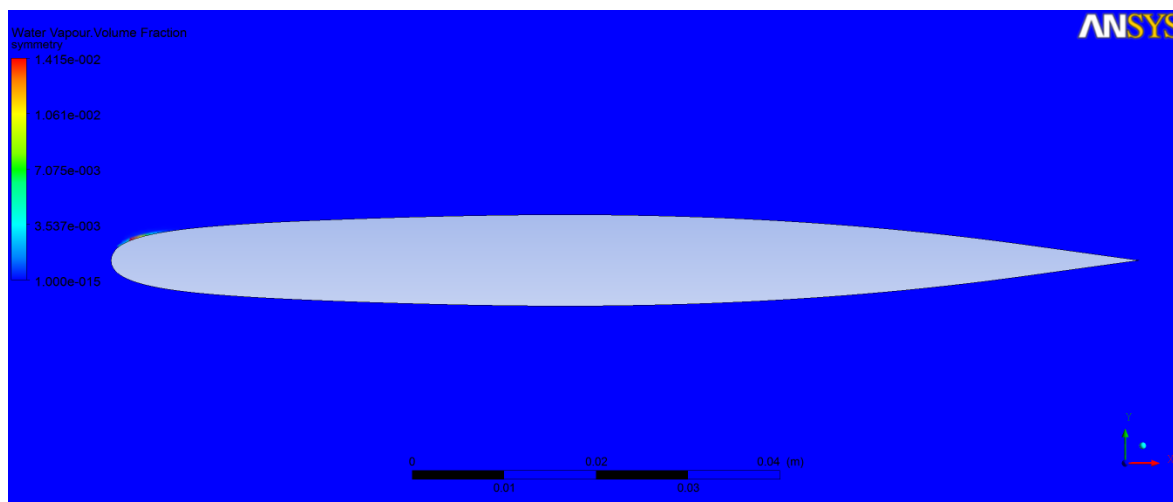


Figura 4.8.1.3

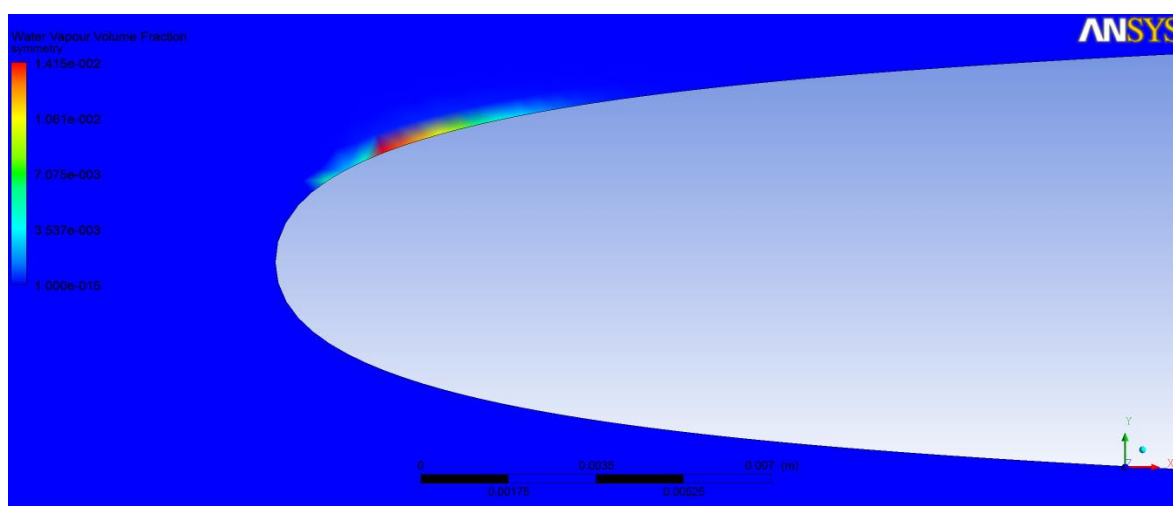


Figura 4.8.1.4 Ampliación de la zona donde se encuentra la lámina de cavitación

$$\sigma = 0,5$$

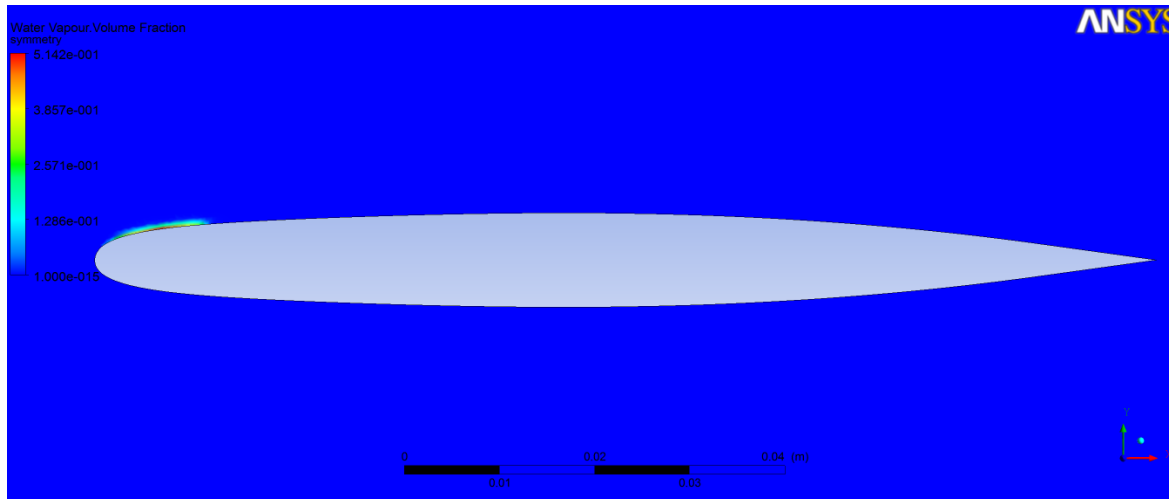


Figura 4.8.1.5

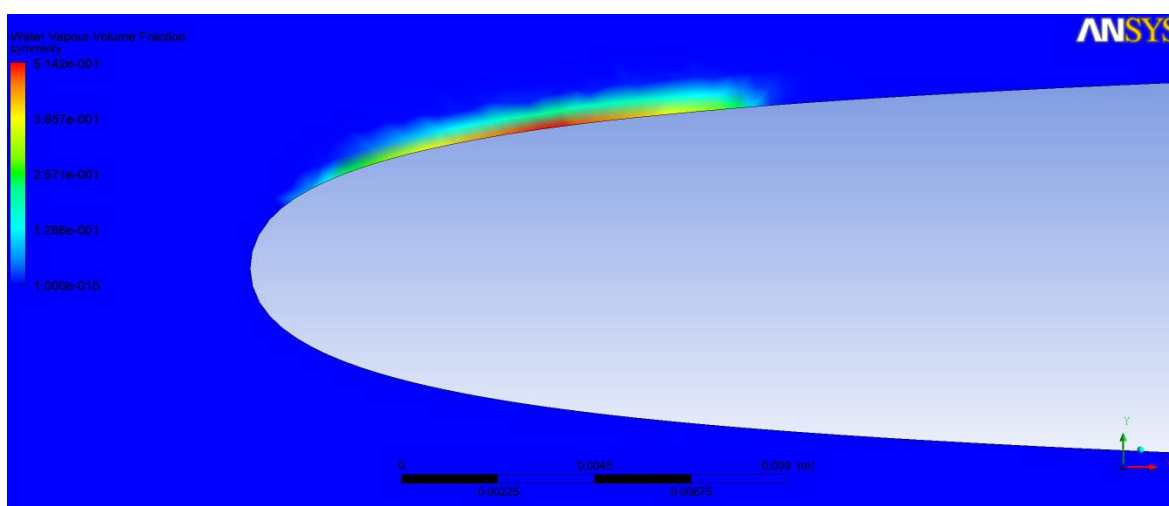


Figura 4.8.1.6 Ampliación de la zona donde se encuentra la lámina de cavitación

$$\sigma = 0,45$$

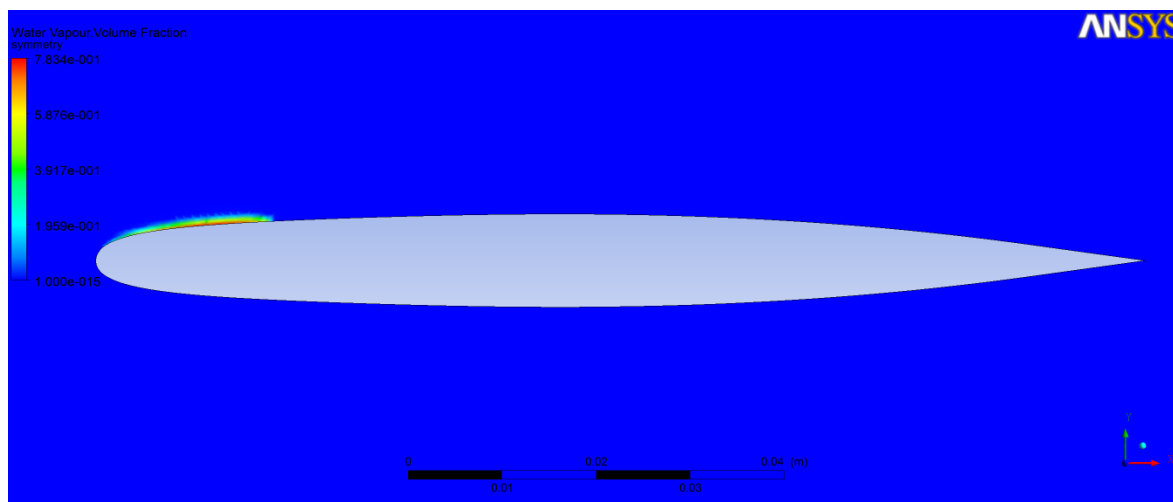


Figura 4.8.1.7

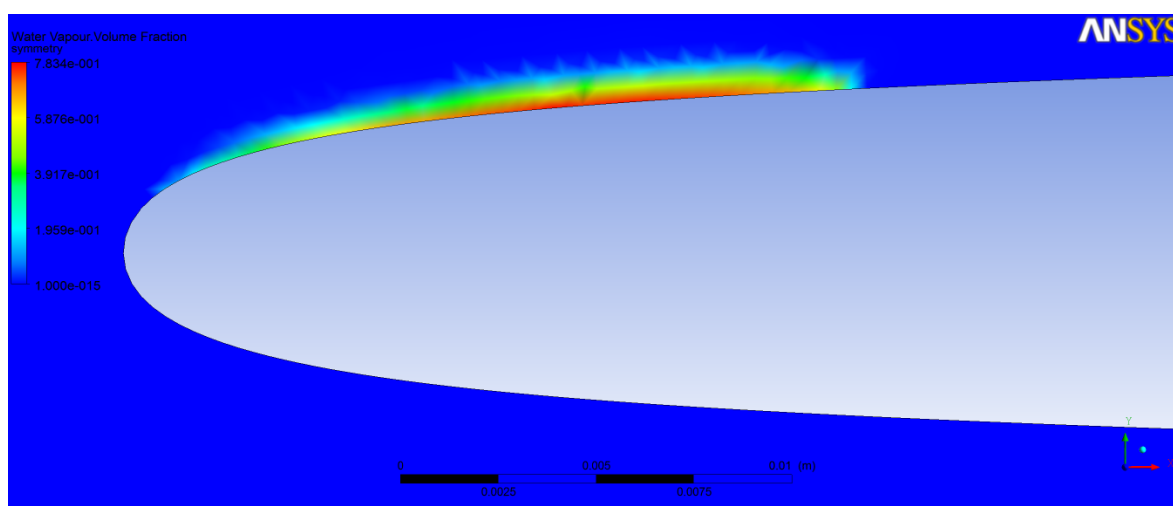


Figura 4.8.1.8 Ampliación de la zona donde se encuentra la lámina de cavitación

$$\sigma = 0,4$$

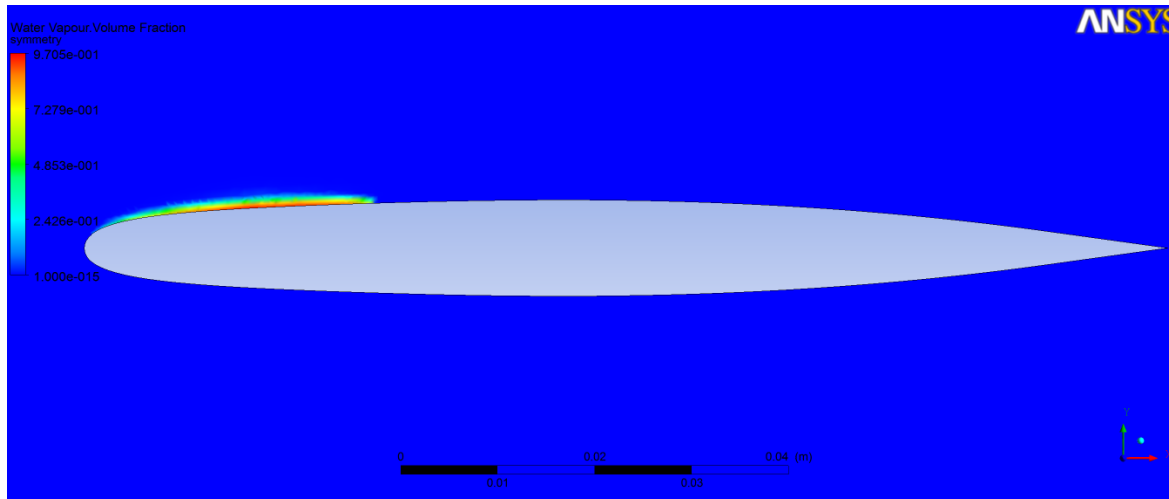


Figura 4.8.1.9

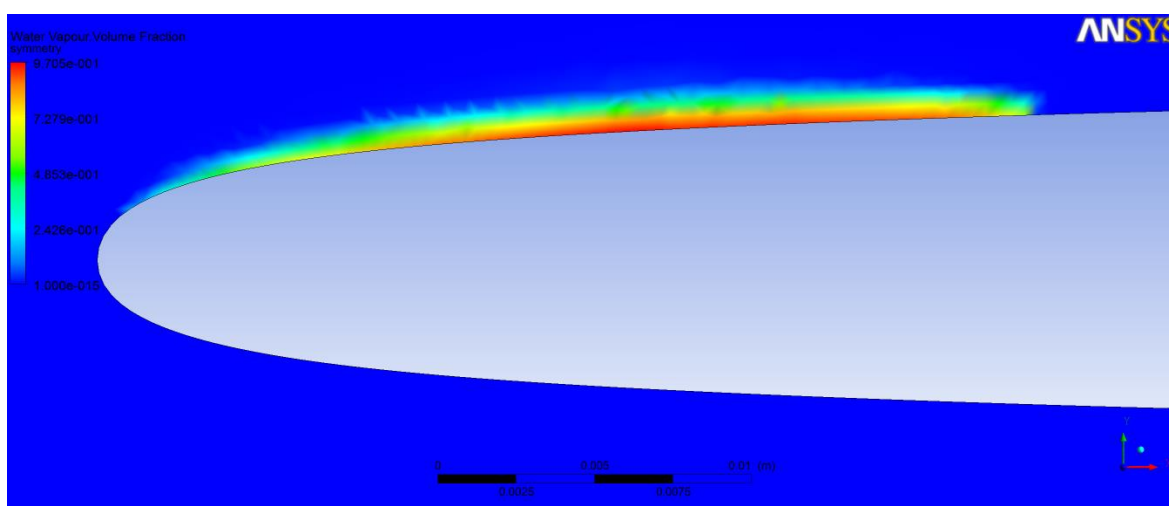


Figura 4.8.1.10 Ampliación de la zona donde se encuentra la lámina de cavitación

$$\sigma = 0,35$$

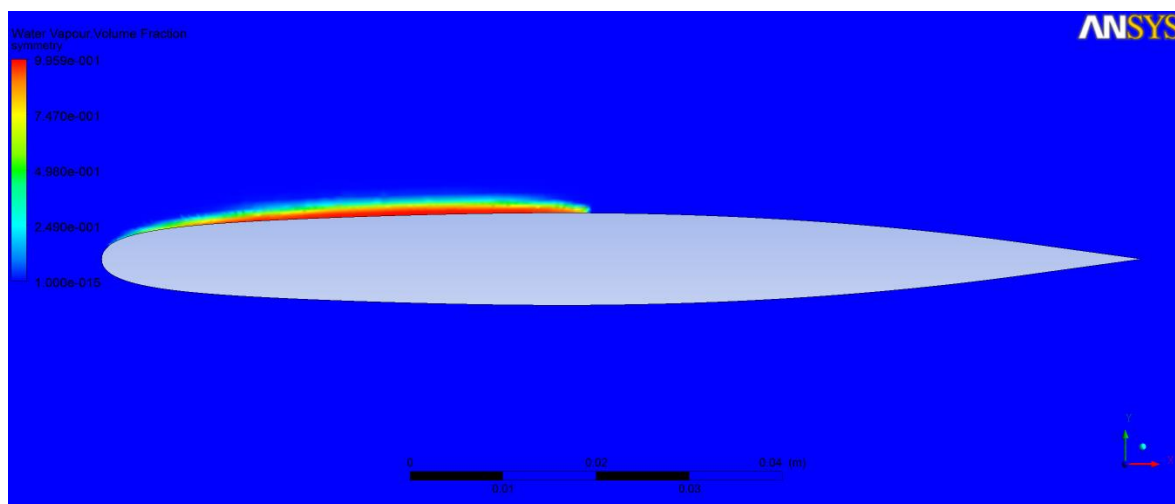


Figura 4.8.1.11

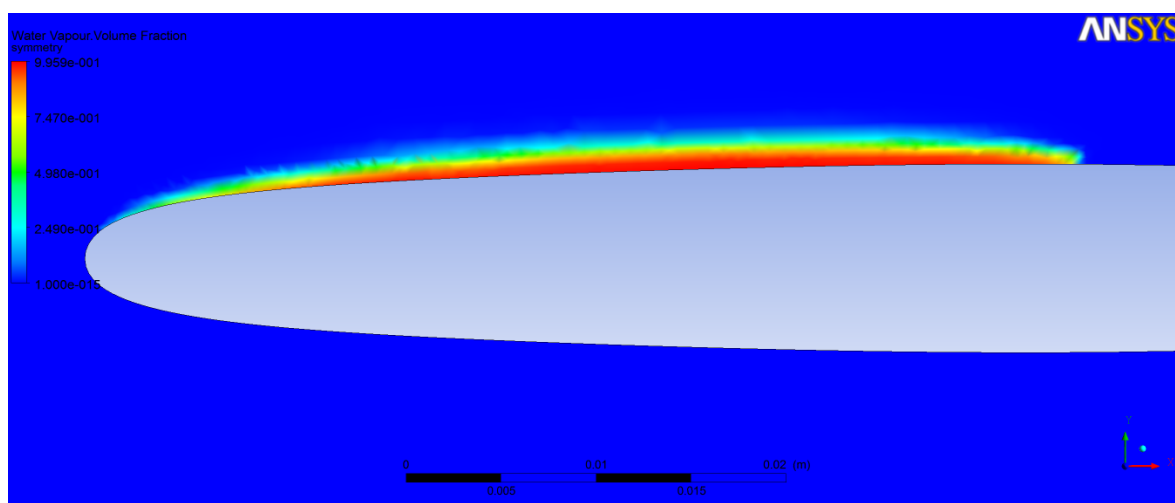


Figura 4.8.1.12 Ampliación de la zona donde se encuentra la lámina de cavitación

$$\sigma = 0,3$$

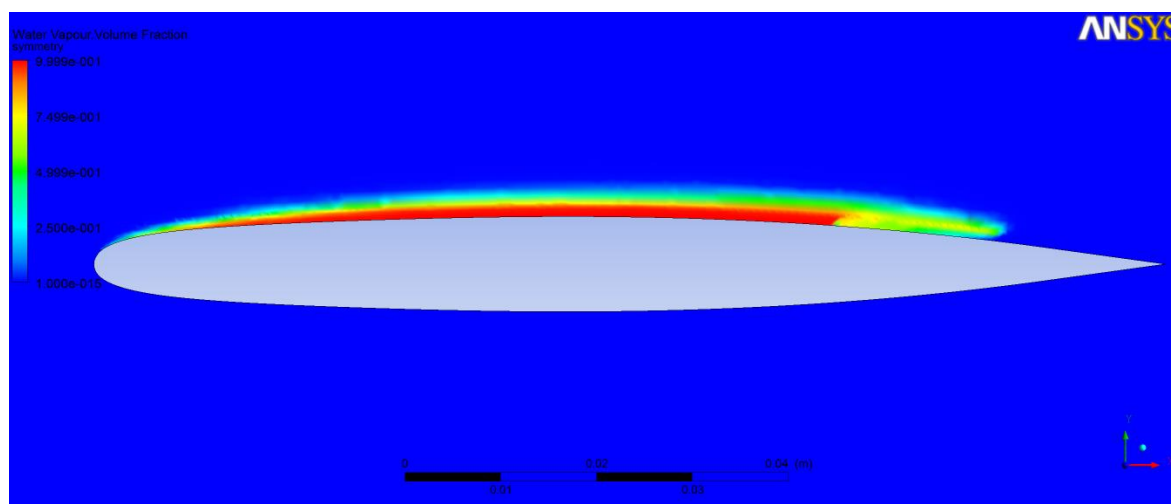


Figura 4.8.1.13

$$\sigma = 0,25$$

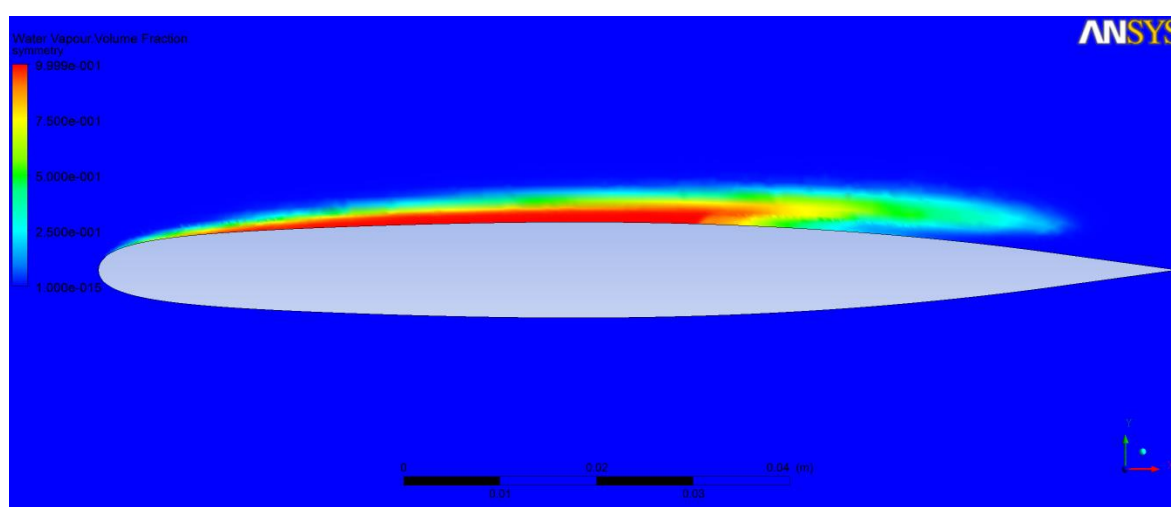


Figura 4.8.1.14

$$\sigma = 0,2$$

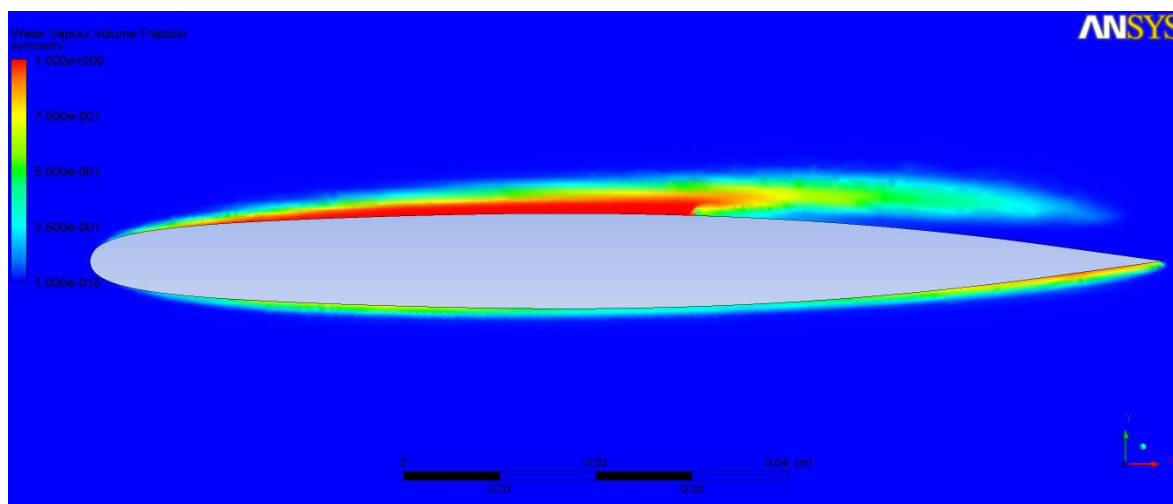


Figura 4.8.1.15

$$\sigma = 0,15$$

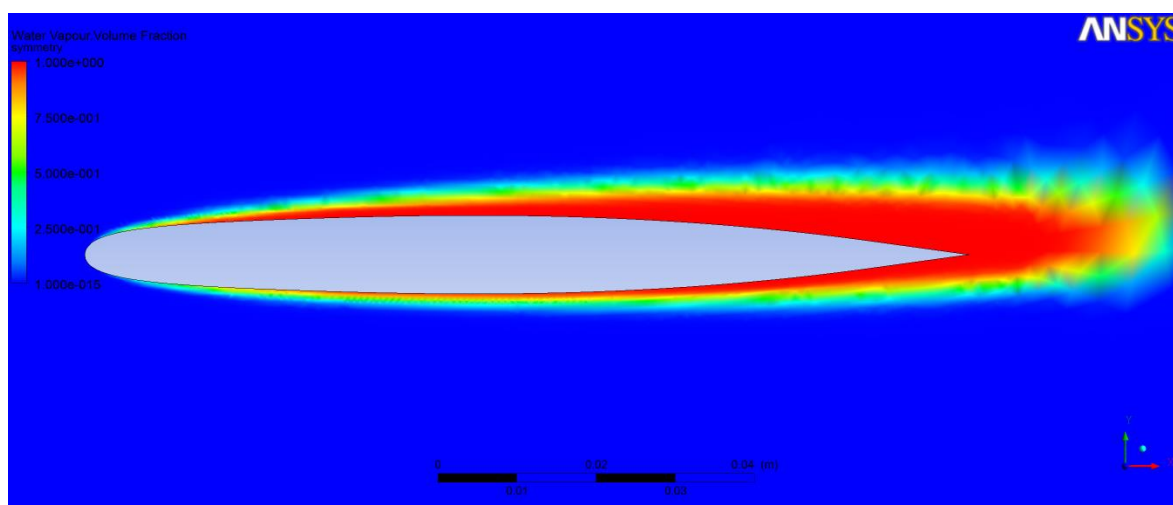


Figura 4.8.1.16

$$\sigma = 0,1$$

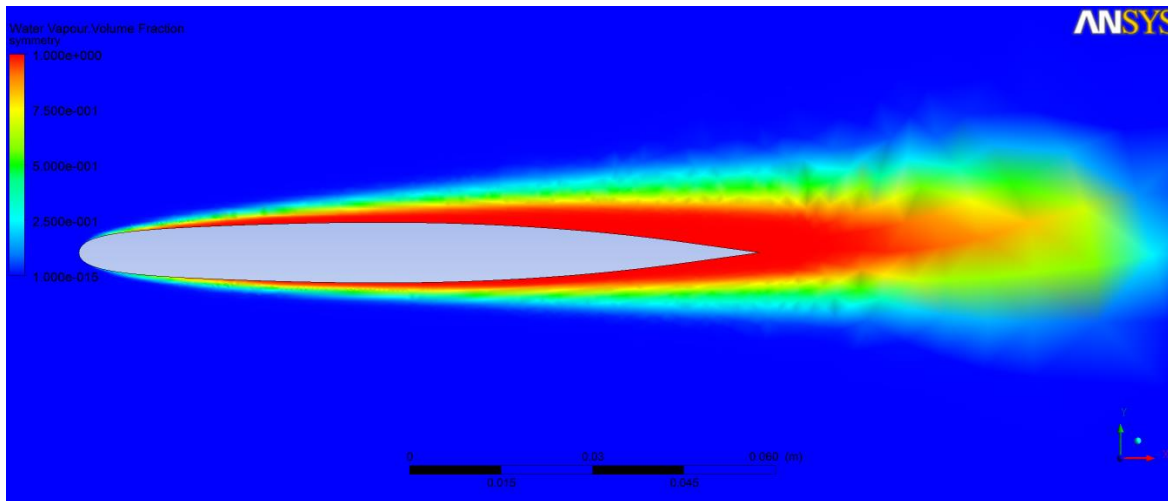


Figura 4.8.1.17

Una vez vistas las figuras anteriores se ve claramente como la lámina de cavitación empieza a aparecer a partir de $\sigma=0,6$ en la parte superior del perfil alar (extradós) cerca del borde de ataque.

A partir de este punto ($\sigma=0,6$), al ir disminuyendo el valor de σ (disminuyendo la presión) la lámina de cavitación cada vez va creciendo y en consecuencia aumenta la región formada por vapor alrededor de la cara de succión del ala.

Cuando la lámina de cavitación llega aproximadamente a la mitad del perfil ($\sigma=0,35$), la curvatura cambia de dirección y por lo tanto el gradiente de presiones se vuelve adverso cosa que hace que a partir de allí la lámina entre en una zona inestable. Este fenómeno se debe a que estamos realizando una simulación estacionaria de un fenómeno no estacionario y por tanto, son zonas inestables dónde como se ha comentado con anterioridad los residuos de la simulación convergen con mayor dificultad. En consecuencia, dependiendo de cuando se pare la simulación, los resultados pueden variar un poco y no seguir la clara tendencia a incrementar la longitud de la lámina de cavitación a medida que disminuye σ como sucede en la realidad. Todo esto se ve reflejado en las imágenes anteriores.

Por último, cabe mencionar que aproximadamente a partir de $\sigma=0,2$, empiezan a verse los

primeros indicios de la aparición de supercavitación. El fluido adquiere una velocidad muy elevada y como consecuencia la presión es muy baja, se ve también como excepto el borde de ataque el resto del perfil alar se encuentra rodeado de vapor de agua). Todo esto, queda muy claro si se observan las imágenes para $\sigma=0,15$ y $\sigma=0,1$ dónde la supercavitación ya está totalmente presente.

La supercavitación es un fenómeno deseado para algunas aplicaciones industriales, al contrario de la cavitación que normalmente es un fenómeno indeseado en cualquier tipo de aplicación (industria naval, aeronáutica, máquinas hidráulicas,...).

4.8.2. Coeficiente de presión (C_p)

El coeficiente de presión, como se ha explicado con anterioridad, es un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo.

Para calcularlo se ha obtenido de Ansys la distribución de presiones absolutas alrededor del perfil alar para cada de x, siendo x la distancia al borde de ataque.

Una vez obtenidos los valores de presión para cada x. Se ha procedido a calcular el C_p con la siguiente fórmula.

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

Dónde:

- P : presión en el punto x obtenida mediante Ansys (es diferente para cada valor de x).
- P_{ref} : Presión de referencia (no cambia en función de x, es característica de cada σ).
- ρ : es la densidad del agua a 16 °C (999,03 kg/m³).
- v : es la velocidad del fluido (15 m/s)

En la siguiente tabla se muestran los valores utilizados de P_{ref} para cada σ .

σ	P_{ref} (Pa)
0,8	91731,5
0,7	80492,4
0,6	69253,3
0,5	58014,2
0,45	52394,7
0,4	46775,2
0,35	41155,6
0,3	35536,1
0,25	29916,5
0,2	24297,0
0,15	18677,4
0,1	13057,9

Tabla 4.8.2

Una vez obtenidos los valores de C_p antes de representarlos se ha dividido cada valor de la distancia x entre c (cuerda) = 111,69 mm con el fin de adimensionalizar los valores.

Finalmente, se ha representado para cada valor de σ la gráfica correspondiente a la evolución de C_p respecto a x/c . Los resultados obtenidos se pueden ver en las figuras mostradas a continuación.

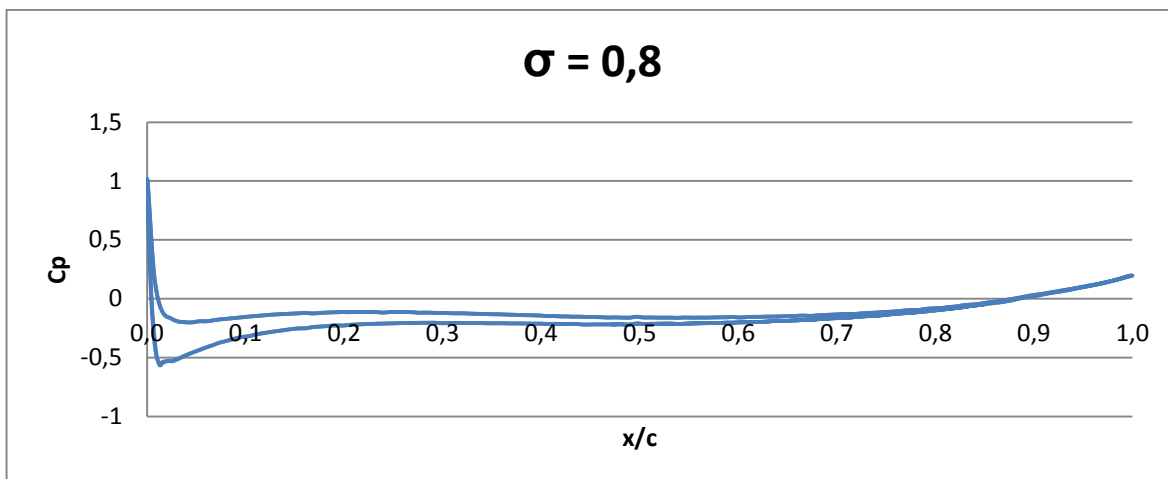


Figura 4.8.2.1

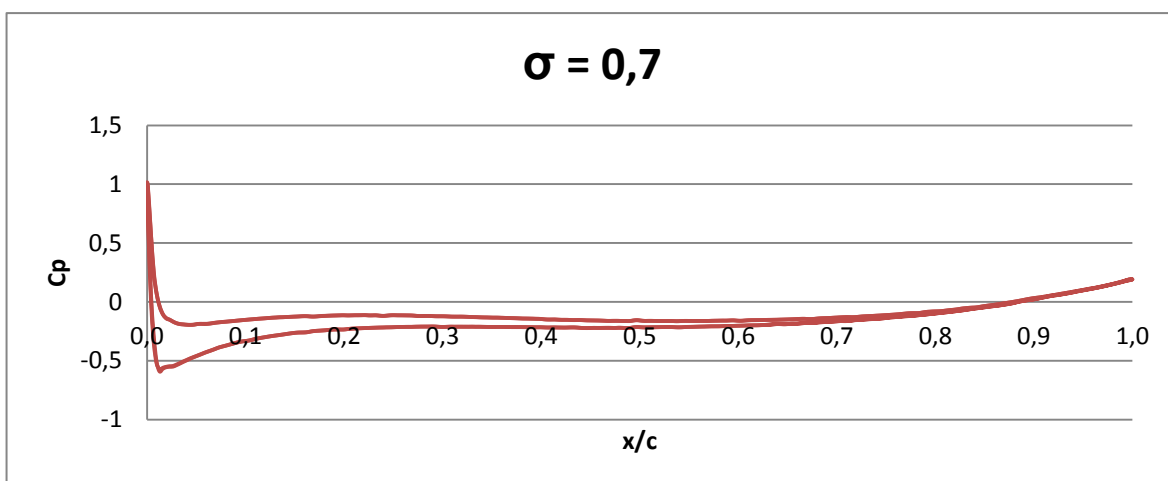


Figura 4.8.2.2

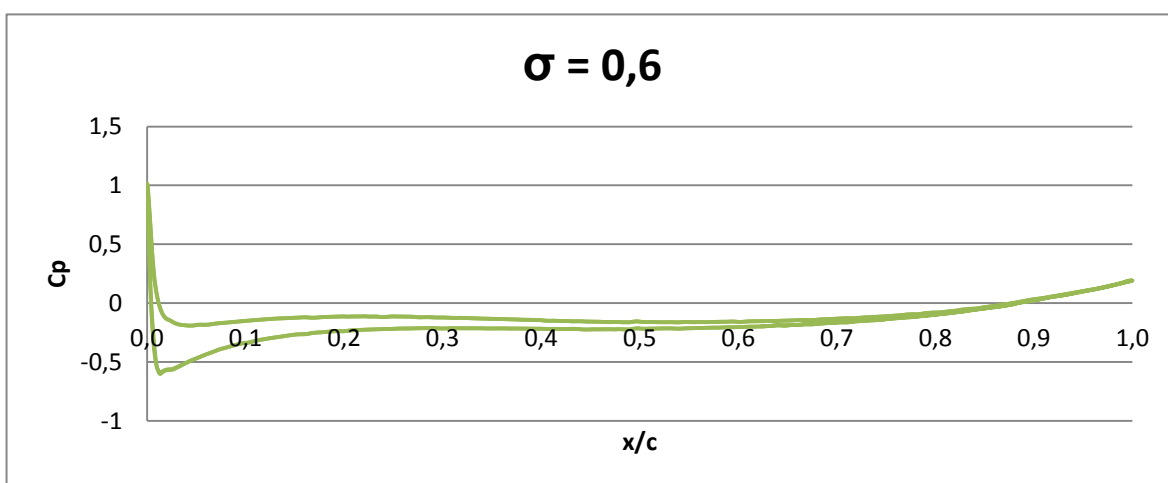


Figura 4.8.2.3

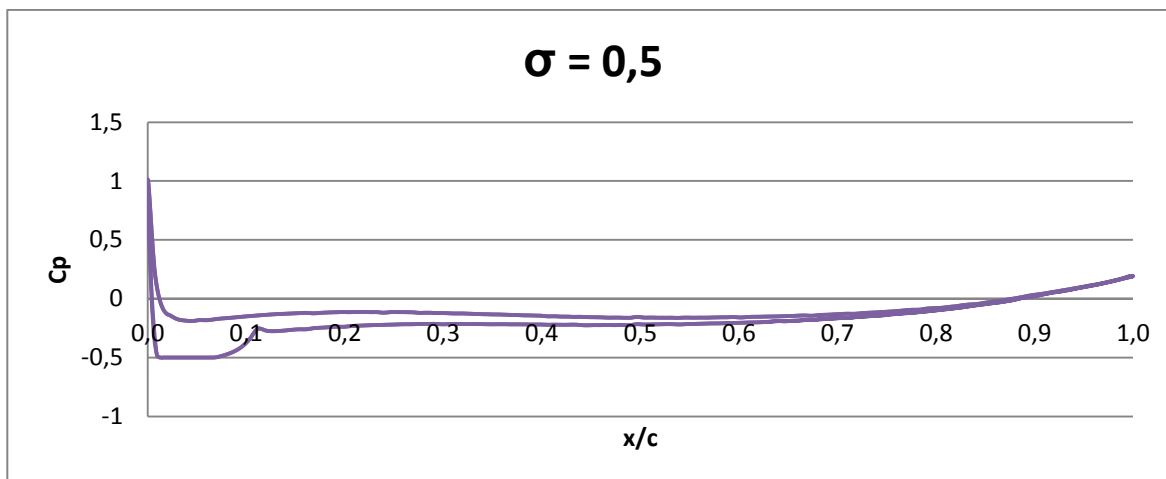


Figura 4.8.2.4

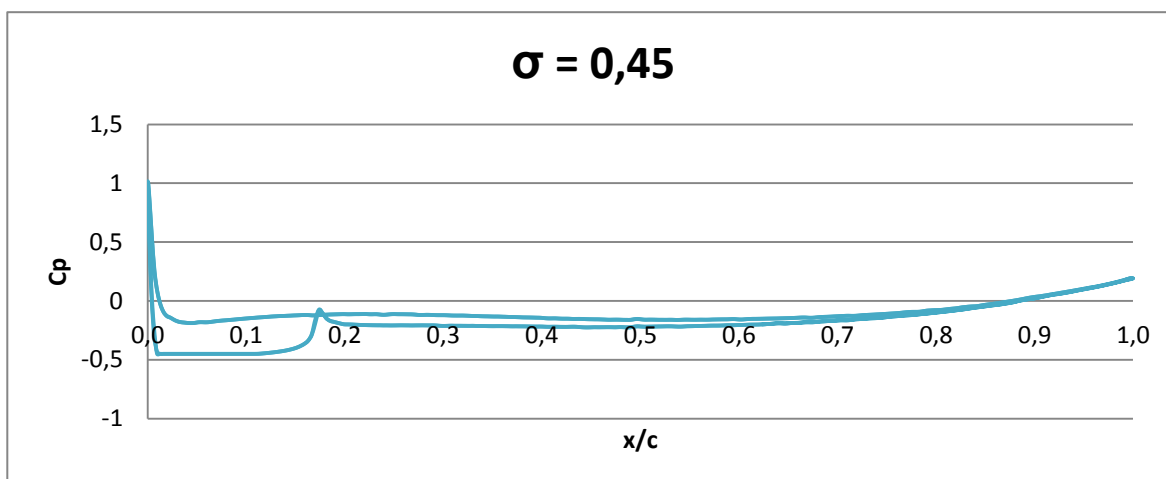


Figura 4.8.2.5

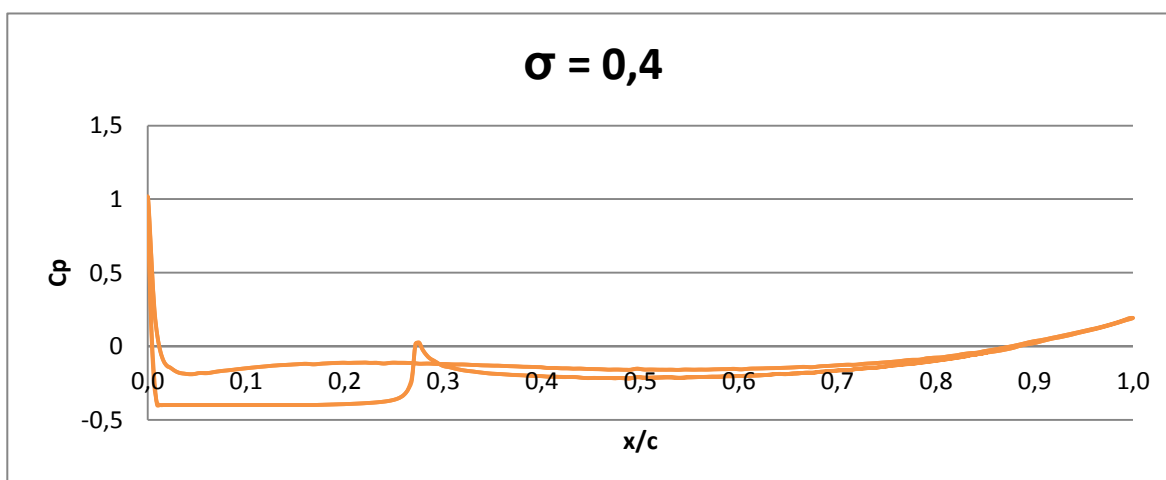


Figura 4.8.2.6

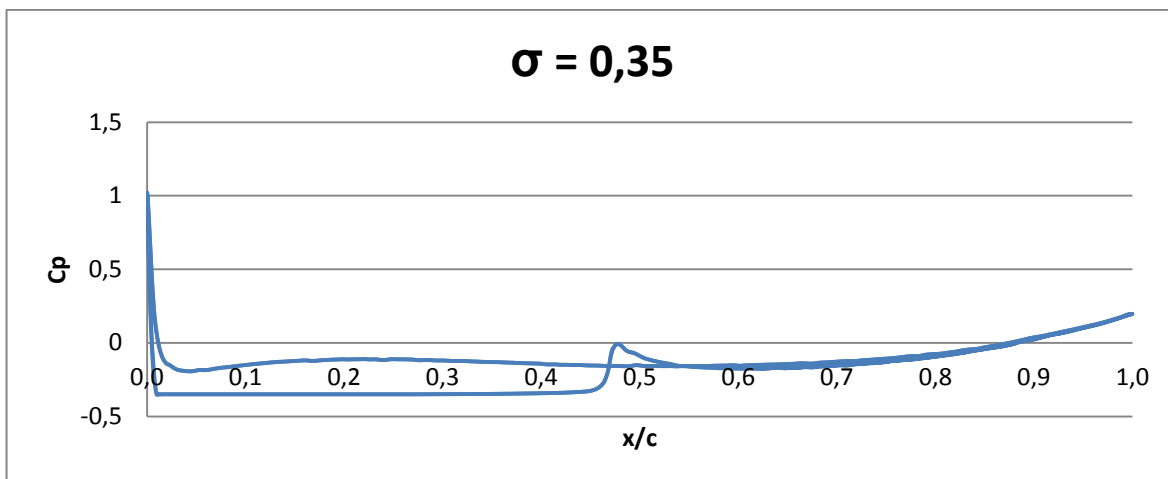


Figura 4.8.2.7

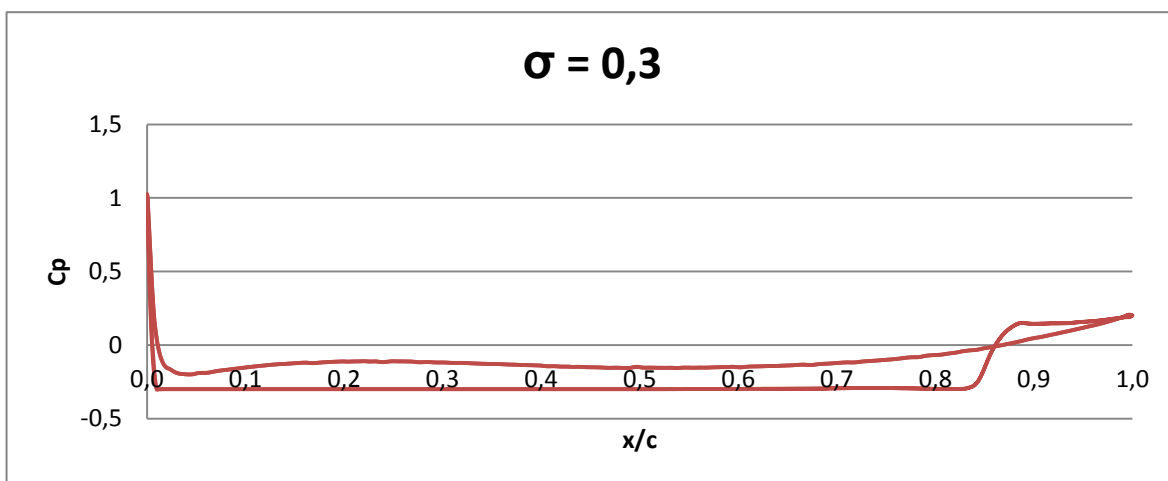


Figura 4.8.2.8

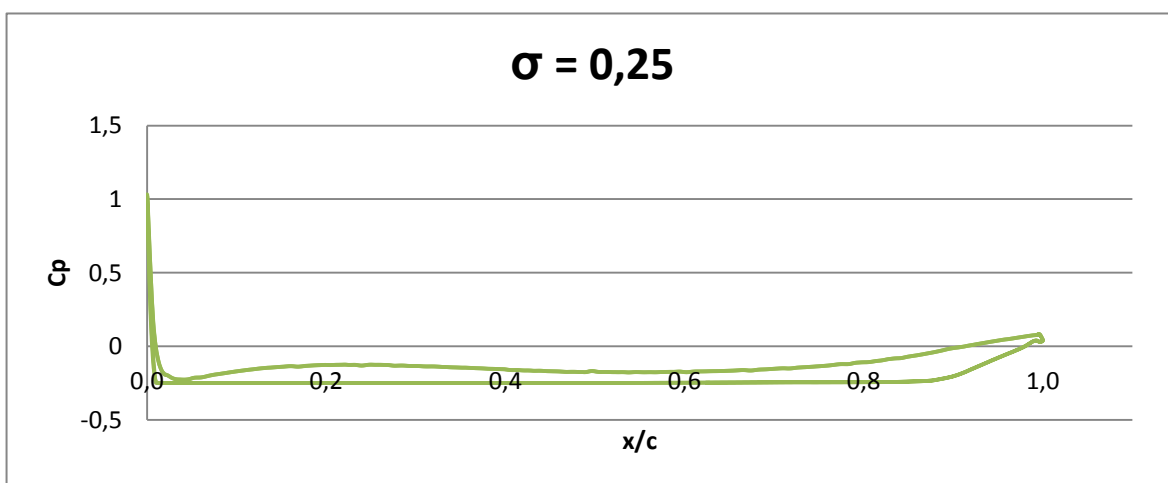


Figura 4.8.2.9

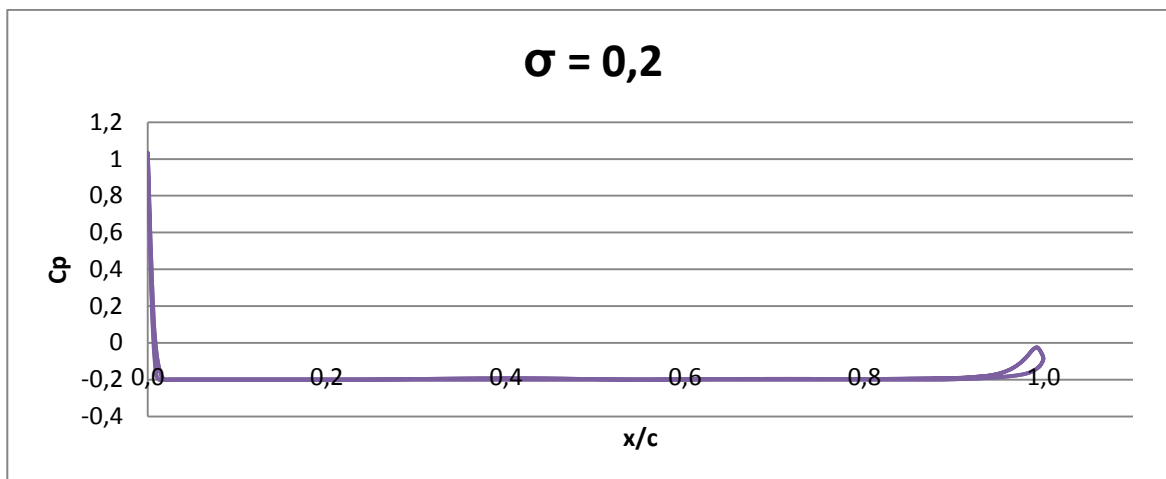


Figura 4.8.2.10

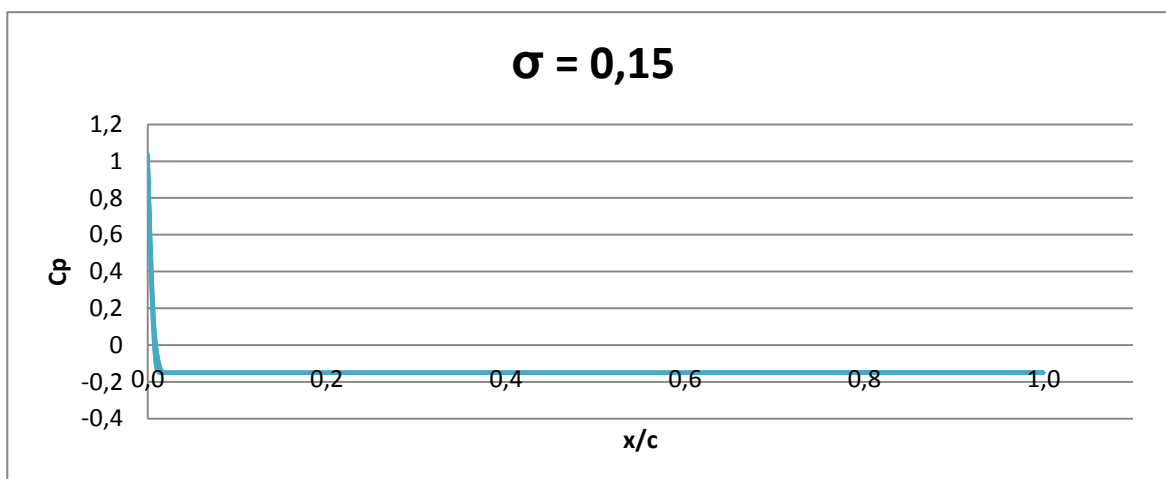


Figura 4.8.2.11

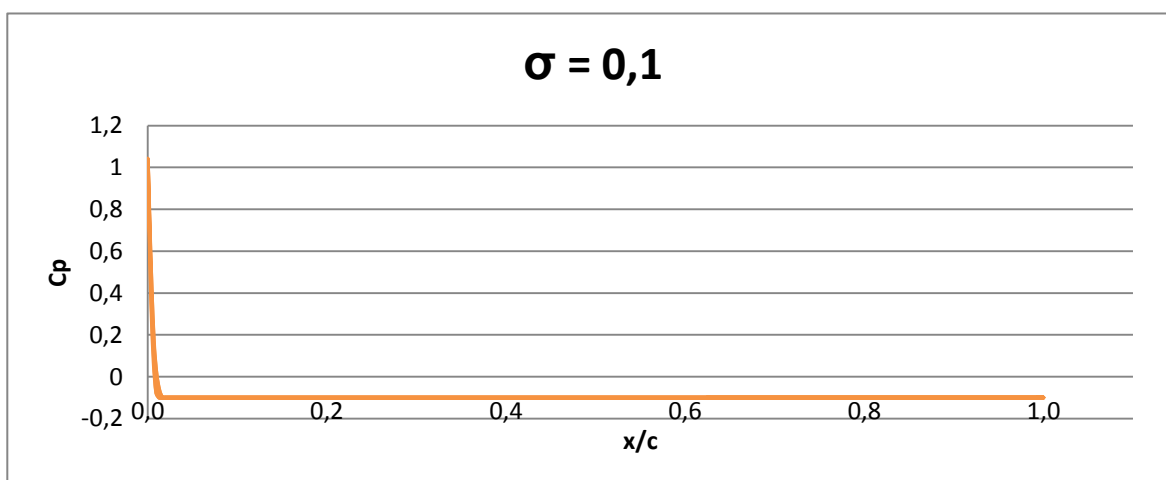


Figura 4.8.2.12

En las figuras vistas anteriormente se ha representado el valor de C_p para cada una de las caras del perfil NACA 0009 (extradós e intradós). La línea superior de cada gráfico corresponde a la cara inferior del perfil y la línea inferior a la cara superior, exceptuando en aquellos valores de σ en los que se produce supercavitación ya que en este caso ambas curvas están prácticamente solapadas.

Se produce cavitación cuando se cumple que $C_p \leq -\sigma$. Por tanto, en los gráficos anteriores podemos ver claramente cuando empieza a producirse la cavitación (a partir de $\sigma=0,6$).

Además, nos sirven para reafirmar y contrastar los resultados obtenidos con la representación de la fracción de vapor para cada σ (apartado 3.9.1). En este caso podemos ver también la longitud de la lámina de cavitación ya que equivale a la longitud del tramo horizontal en el que $C_p = -\sigma$ multiplicada por la cuerda ($c=111,69$ mm).

Se ve perfectamente como siempre es la cara de succión (superior) la que presenta cavitación ya que en los gráficos anteriores la línea que representa al extradós es la única que se mantiene durante cierto tiempo con un valor de $C_p = -\sigma$ (exceptuando el caso de supercavitación).

Cabe destacar que en los casos en que existe cavitación, justo después de este fenómeno hay un cambio brusco en el valor de C_p . Este fenómeno se debe a que justo después de la lámina de cavitación, parte del fluido tiende a ir hacia atrás y otra parte sigue hacia delante, este hecho provoca que allí se produzca un punto de estancamiento (velocidad del fluido nula y presión máxima) cosa que hace entender este aumento tan grande del coeficiente de presión.

Se ha realizado el siguiente gráfico para reflejar de manera clara las diferencias de comportamiento entre los tres estados que se han visto durante las simulaciones:

- $\sigma = 0,8$: Los valores de C_p se encuentran siempre por encima del valor de $-\sigma$ para todo rango de $x/c \rightarrow$ No hay cavitación.
- $\sigma = 0,4$: Durante un cierto rango de valores de x/c (desde 0,01 hasta 0,2 aproximadamente), los valores de C_p se mantienen constantes e iguales a $-\sigma \rightarrow$ Sí hay cavitación.
- $\sigma = 0,1$: Los valores de C_p se mantienen iguales a $-\sigma$ para todo rango de valores de x/c (excepto al principio que corresponde a la zona del borde de ataque) \rightarrow Hay supercavitación.

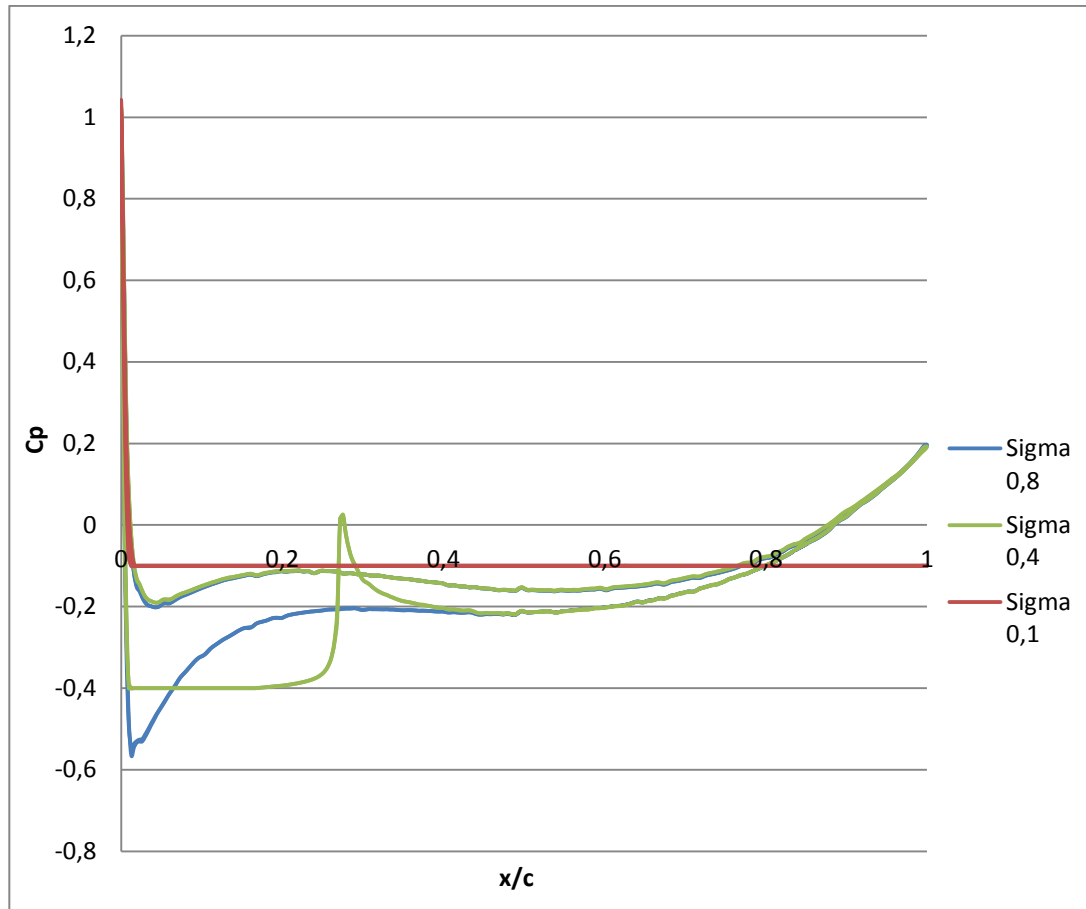


Figura 4.8.13

4.8.3. Longitud de la lámina de cavitación

4.8.3.1. Comparación de los valores obtenidos mediante la fracción de vapor y mediante el C_p

En los dos apartados anteriores (3.9.1 y 3.9.2), se ven dos formas diferentes de poder calcular la longitud de la lámina de cavitación.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos en cuanto a la longitud de la lámina de cavitación (L) para cada valor de σ , mediante la fracción de vapor de agua (apartado 3.9.1) y la representación del coeficiente de presión (C_p) (apartado 3.9.2).

σ	L/c (apartado 4.8.1)	L/c (apartado 4.8.2)
0,8	0	0
0,7	0	0
0,6	0,01635	0,01739
0,5	0,05756	0,05714
0,45	0,11191	0,10476
0,4	0,18254	0,18182
0,35	0,40435	0,42714
0,3	0,73901	0,82864
0,25	0,67189	0,88724
0,2	0,58134	0,96372
0,15	>1	>1
0,1	>1	>1

Tabla 4.8.3.1.1

En la tabla anterior, se ve como claramente en el primer caso (apartado 4.8.1) a partir de zonas donde existe cavitación ($\sigma=0,35$) la longitud de la lámina no tiene el valor que debería tener ya que como hemos explicado en apartados anteriores entra en una zona inestable y por tanto, depende de cuando se pare la simulación los valores serán diferentes aunque en promedio se sabe que la lámina va creciendo para valores de σ cada vez más pequeños.

Por todo esto, se ha decidido en apartados posteriores, realizar la comparativa de los resultados simulados con los obtenidos empíricamente utilizando los resultados obtenidos mediante los valores de C_p en función de σ (apartado 4.8.2).

4.8.3.2. Comparación de los resultados obtenidos mediante simulación y los obtenidos experimentalmente

El gráfico que se muestra a continuación es una representación de L/c (media) en función de σ .

Por un lado, la curva de color rojo, corresponde a la curva realizada mediante los datos obtenidos por simulación. Por otro lado, la curva de color azul, corresponde a la curva realizada mediante los datos obtenidos durante la experimentación en la universidad de Lausana.

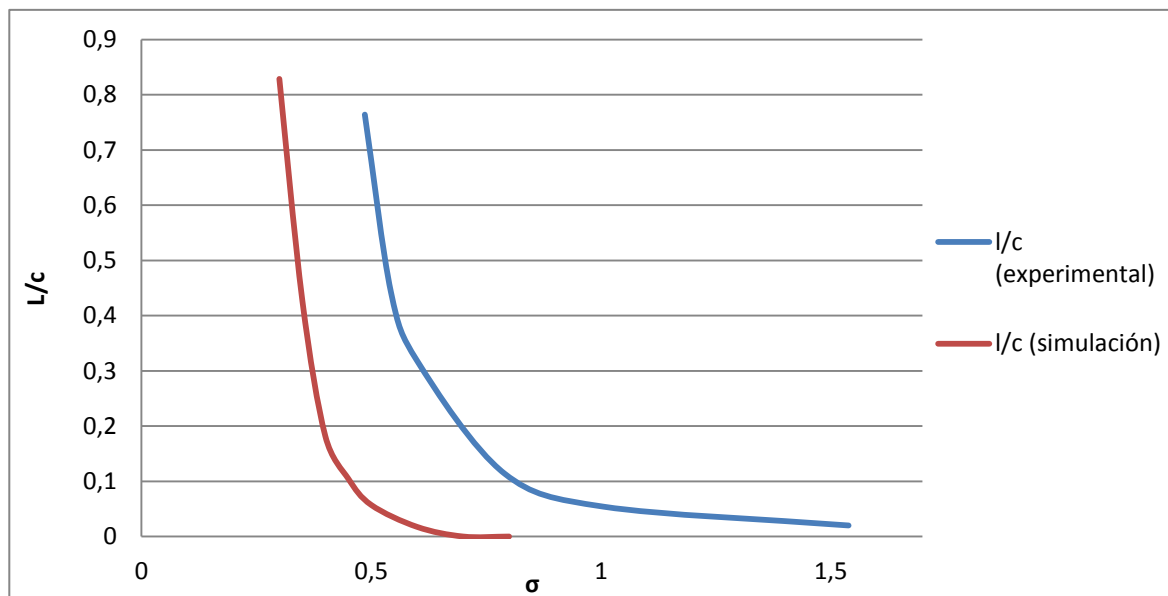
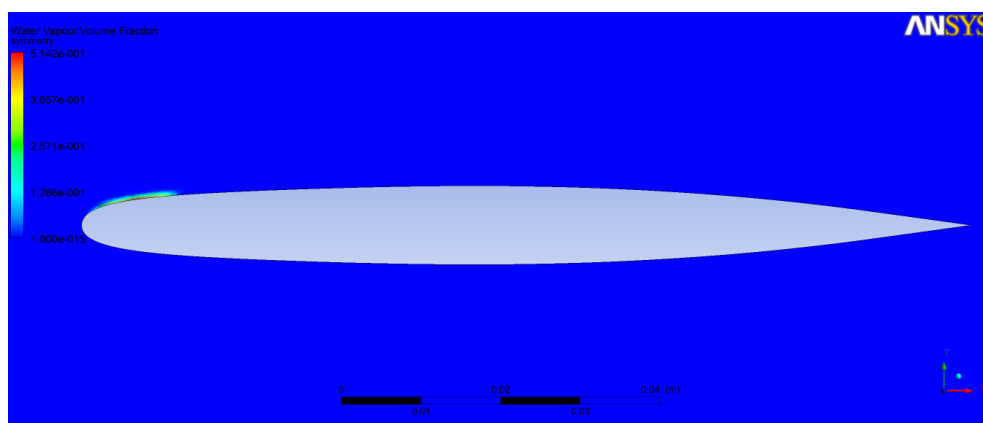


Figura 4.8.3.2.1

Se puede observar que ambas curvas siguen una tendencia similar ya que tienen un comportamiento igual pero con la diferencia de que en una (experimental) se produce la cavitación antes que en la otra (simulada).

Esta diferencia existente se debe a que para simplificar la simulación, se ha prescindido de la rugosidad que existía en la parte inicial del perfil y del corte existente al final del mismo.

A continuación, siguiendo con la comparativa de los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación, se muestran imágenes correspondientes a los experimentos realizados en un túnel de agua por la universidad de Lausana juntamente con las imágenes homólogas obtenidas mediante simulación. Así pues, se puede observar como la simulación realizada con Ansys, se ajusta bastante bien al fenómeno producido en la realidad.

σ grande*Figura 4.8.3.2 Lámina de cavitación experimental para σ elevado**Figura 4.8.3.2.3 Lámina de cavitación simulada para σ elevado* **σ intermedio***Figura 4.8.3.2.4 Lámina de cavitación experimental para σ intermedio*

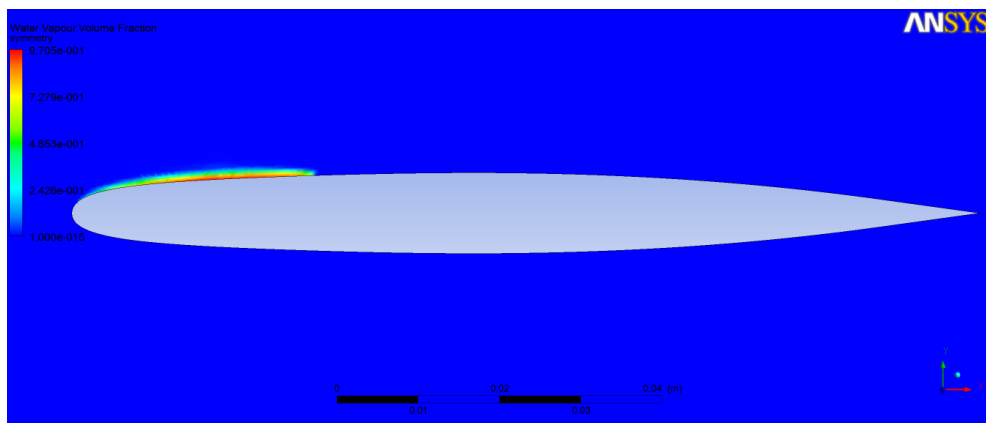


Figura 4.8.3.2.5 Lámina de cavitación simulada para σ intermedio

σ bajo



Figura 4.8.3.2.6 Lámina de cavitación (supercavitación) simulada para σ bajo

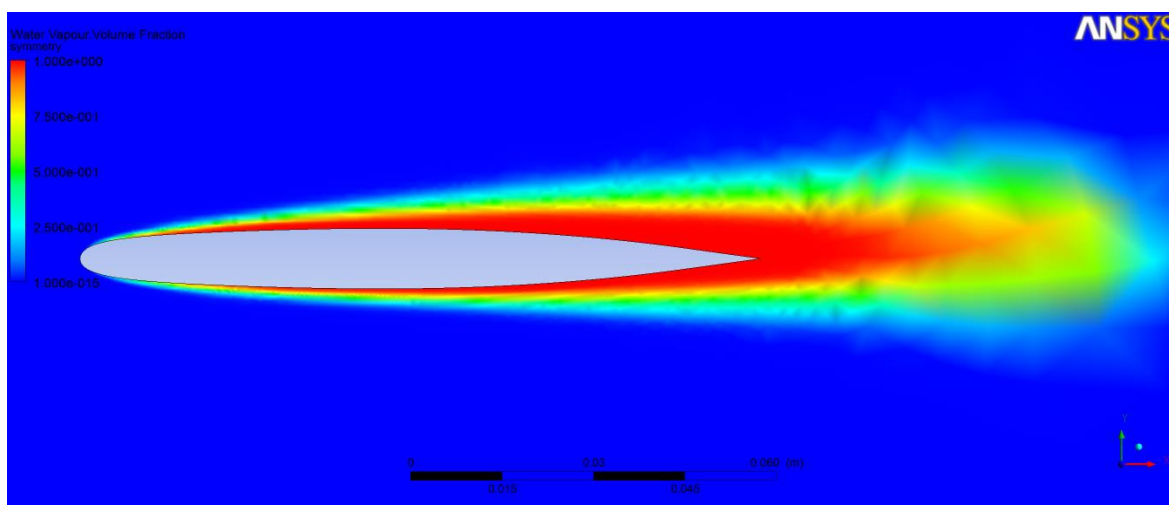


Figura 4.8.3.2.7 Lámina de cavitación (supercavitación) simulada para σ bajo

4.8.4. Coeficiente de sustentación (C_L) y de resistencia al avance (C_D)

Para poder calcular los valores de C_L y C_D explicados con anterioridad en el apartado 2.6, se ha procedido de la siguiente manera:

Primeramente, se obtuvieron del programa Ansys para cada valor de σ los resultados correspondientes a las fuerzas en el eje x (F_x) y en el eje y (F_y). Estas fuerzas no se corresponden exactamente al valor de F_D y F_L debido a que el perfil alar se encuentra con un ángulo de inclinación de 1° . Por tanto, para poder obtener los valores de F_D y F_L , se calculó primero el valor de la F_{TOTAL} de la siguiente forma:

$$F_{TOTAL} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

El siguiente paso fue calcular el ángulo α (en grados) mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{F_x}{F_{TOTAL}}\right)$$

Una vez calculado α , ya se pueden calcular los valores correspondientes a las fuerzas F_L y F_D . Se han calculado de la siguiente forma:

$$F_L = F_{TOTAL} \cdot \cos(\alpha - 1)$$

$$F_D = F_{TOTAL} \cdot \cos(90 - \alpha + 1)$$

Finalmente los valores de C_L y C_D se calcularon siguiendo sus ecuaciones características explicadas con anterioridad. Las ecuaciones son las siguientes:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Las siguientes figuras muestran la representación de C_D y C_L para cada valor de σ y también en función de L/c (L es la longitud de la lámina de cavitación y c corresponde al valor de la cuerda).

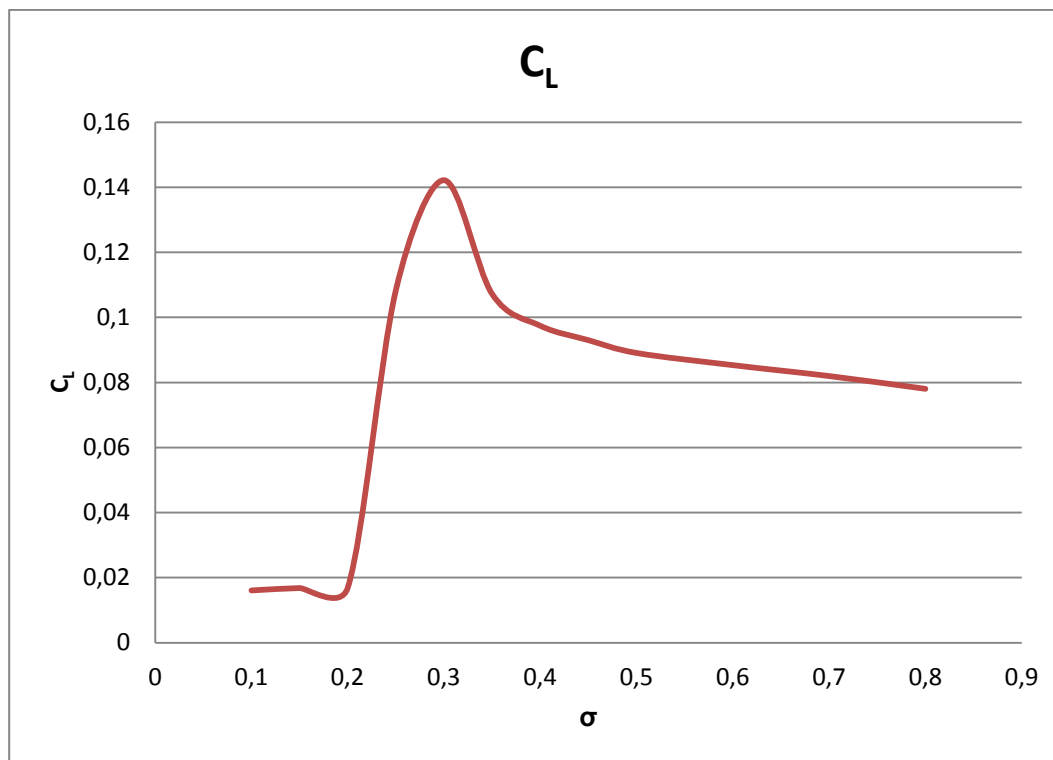


Figura 4.8.4.1 C_L en función de σ

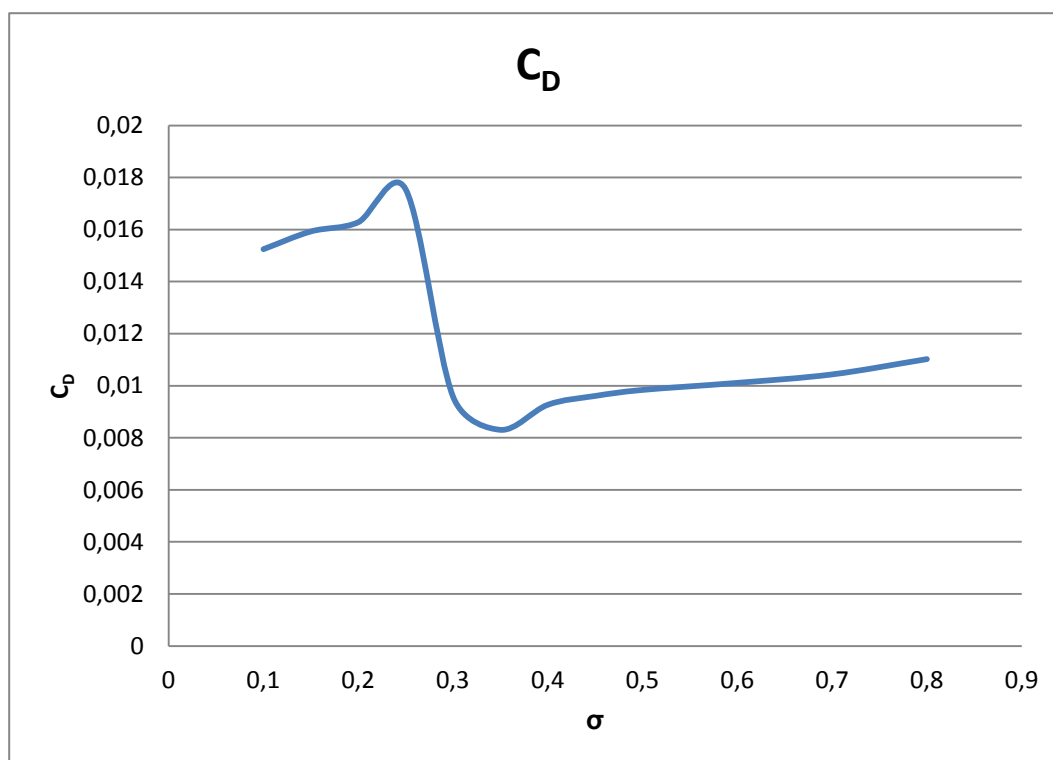


Figura 4.8.4.2 C_D en función de σ

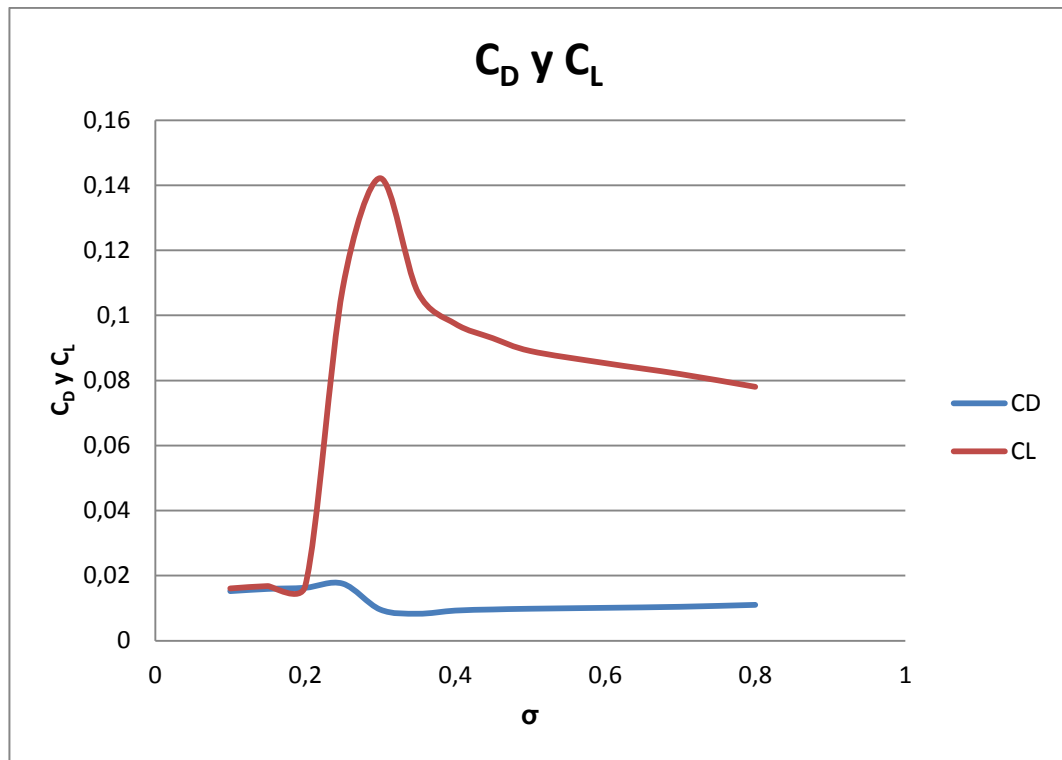


Figura 4.8.4.3 C_L y C_D en función de σ

En cuanto a los tres gráficos anteriores que muestran el comportamiento de los coeficientes adimensionales C_L y C_D en función de σ , cabe mencionar que cuando empieza a aparecer la cavitación (manteniendo la velocidad del fluido y el ángulo de inclinación del perfil constantes), el valor de C_L empieza a aumentar y por tanto el perfil hidrodinámico gana en sustentación, mientras que el valor de C_D se mantiene más o menos constante.

Este hecho se sigue produciendo hasta que llegamos a valores de σ bajos que coincide con los puntos en que se empieza a dar la supercavitación. Se puede observar además que durante la supercavitación el valor de ambos coeficientes es aproximadamente igual, la sustentación y la resistencia al avance son iguales aproximadamente y tienen valores de un orden pequeño.

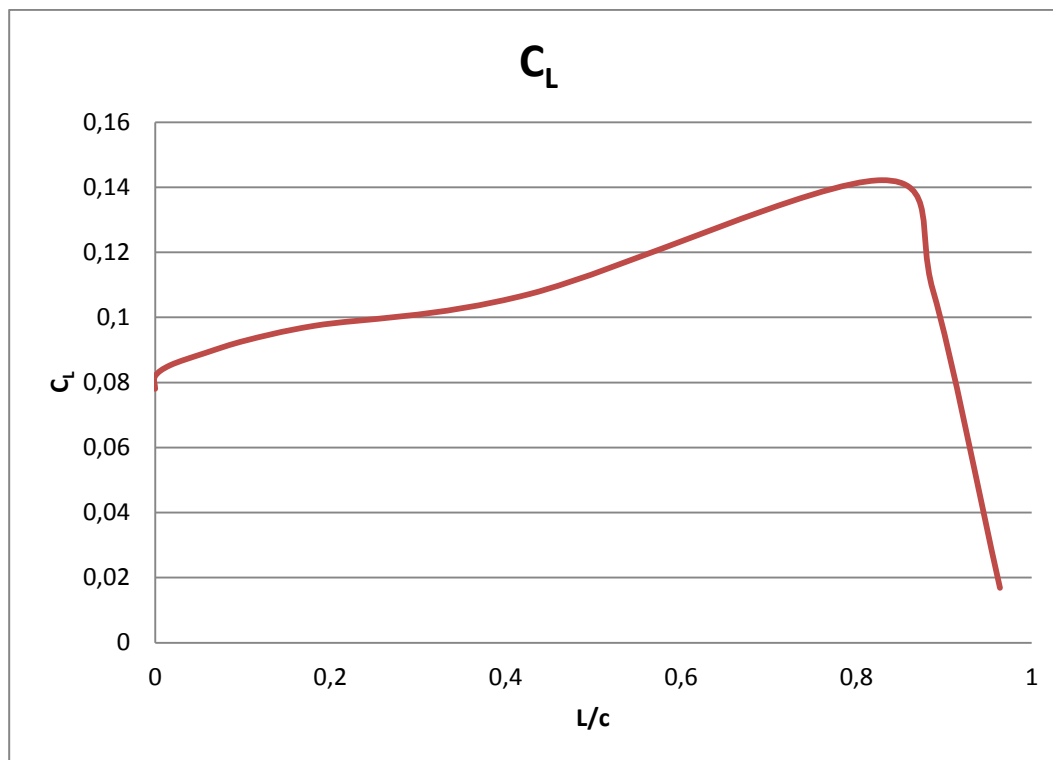


Figura 4.8.4.4 C_L en función de L/c

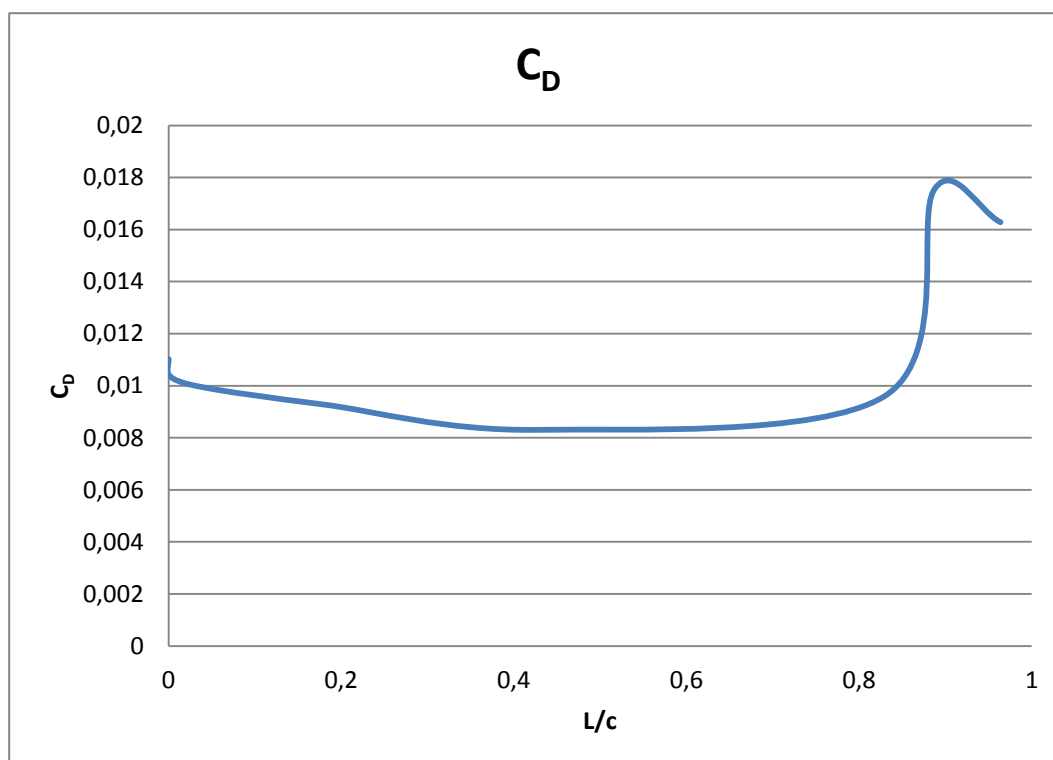


Figura 4.8.4.5 C_D en función de L/c

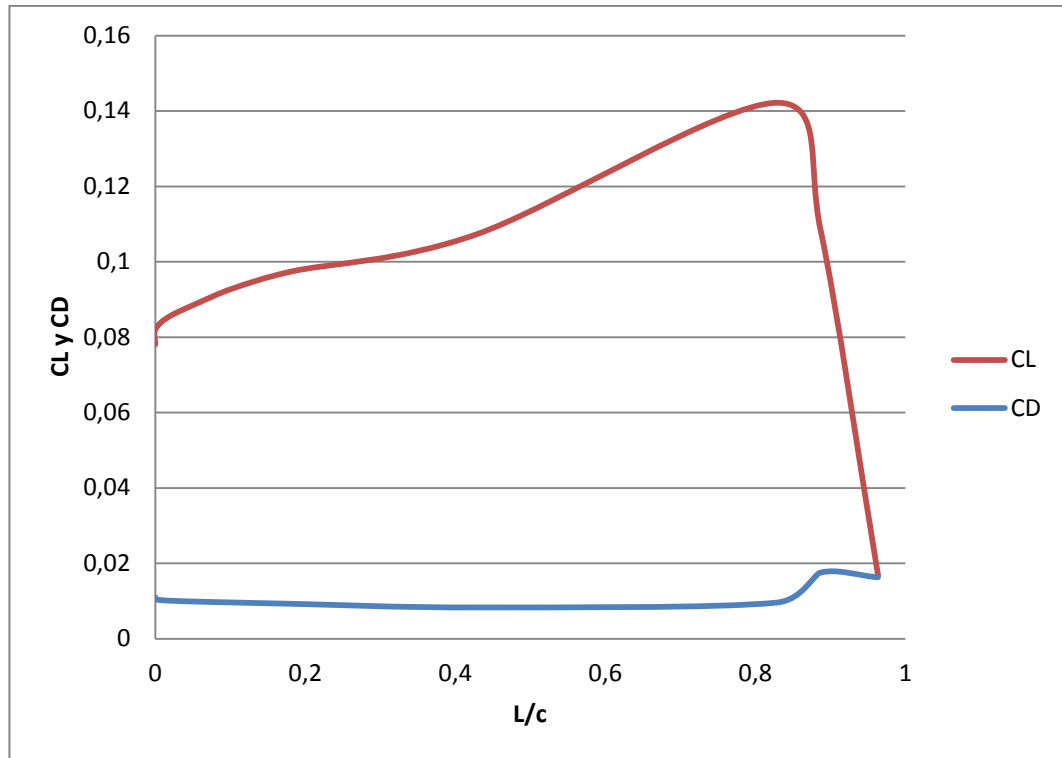


Figura 4.8.4.6 C_L y C_D en función de L/c

Por lo que respecta a la representación de los coeficientes adimensionales C_L y C_D en función de L/c (siendo L la longitud de la lámina y c la longitud de la cuerda), se produce un fenómeno muy similar al explicado anteriormente.

A medida que vamos aumentando la longitud de la lámina de cavitación para valores de α (ángulo de inclinación) y velocidad constantes, los valores de C_L aumentan progresivamente, en cambio para C_D se produce todo lo contrario. Sin embargo, una vez se llega a zonas cercanas a la supercavitación este efecto se produce de manera inversa. Es decir, C_L disminuye al aumentar la lámina de cavitación y C_D aumenta.

Los aspectos vistos con anterioridad, pueden tener muchas aplicaciones dentro del mundo de la aerodinámica, ya que como vemos con la aparición de la cavitación podemos obtener perfiles con mayor sustentación y menor resistencia al avance.

5. Impacto medioambiental

Este proyecto ha sido realizado entre casa y la universidad. Todo el trabajo se ha realizado mediante un ordenador, desde el cual se ha buscado información, se ha mantenido contacto con el tutor y se han realizado todas las simulaciones pertinentes con el fin de extraer resultados concluyentes. Estos resultados, también mediante el ordenador, han sido analizados para posteriormente sacar conclusiones de los mismos.

Además, para realizar algunos cálculos también se ha hecho uso de una calculadora científica programable.

Por tanto, el impacto medioambiental generado en la creación de este proyecto es muy bajo. Aún y así, hay algunos aspectos que sí que deben ser considerados:

- Consumo energético de electricidad debido a la iluminación, el teléfono, la ventilación, la calefacción y sobre todo el ordenador ya que al haber estado usando un software de simulación, en muchas ocasiones las simulaciones han llegado a tardar periodos largos de tiempo en ejecutarse durante los cuales se ha tenido que dejar el ordenador encendido.
- Consumo de papel, herramientas de escritura, tinta de impresión,... usados para hacer cálculos, bocetos, apuntes e impresiones de cosas relacionadas con el proyecto.

De todas formas, si este proyecto se llevara a cabo por alguna empresa, institución o persona para investigar el fenómeno de la cavitación sobre un perfil alar, podría traer consigo varias mejoras en cuanto al impacto ambiental. Así pues, podría llegar a ser prescindible o poco necesaria la experimentación con prototipos reales que reduciría el consumo de electricidad, agua y materiales necesarios para la experimentación.

6. Presupuesto

Por lo que se refiere al presupuesto de este proyecto, en la siguiente tabla se especifican los gastos asociados en términos de horas empleadas, coste por hora y coste final.

	Horas (h)	Precio/Hora (€/h)	Coste (€)
Horas Becario	450	6	2700
Horas Ingeniero	35	30	1050
Material de oficina	-	-	150
Ordenador	-	-	1000
Impresora	-	-	100
Teléfono e Internet (6 meses)	-	-	300
Consumo de luz (6 meses)	-	-	150
Licencia educacional Ansys (1 año)	-	-	200
Licencia educacional de SolidWorks (1 año)	-	-	250
Licencia Microsoft Office (1 año)	-	-	110
Desplazamiento	-	-	600
TOTAL SIN IVA		6610	
TOTAL CON IVA (21%)		7998,1	

Conclusiones

Una vez finalizada la realización del Trabajo final de Grado en Tecnologías Industriales que trata sobre la simulación numérica mediante Ansys de un flujo de agua sobre un perfil hidrodinámico NACA 0009 bajo condiciones de cavitación, se han podido obtener las conclusiones que se exponen debajo.

Primeramente, se ha podido realizar una comparación entre los resultados experimentales obtenidos por la universidad de Lausana (Suiza) y los resultados alcanzados en este proyecto mediante la simulación numérica.

Esta comparación, como se ve durante el trabajo, ha resultado satisfactoria ya que los resultados que se han obtenido presentan una morfología y configuración muy parecidas a las de los resultados obtenidos empíricamente. Por tanto, se puede concluir que la simulación realizada es correcta y que los resultados alcanzados simulan el fenómeno de estudio con gran veracidad.

En cuanto a los resultados se ve como la cavitación aparece antes en la simulación numérica que en la experimentación. Este hecho se atribuye a que se han realizado una serie de simplificaciones (no se simula la rugosidad al principio del perfil alar ni el corte que tiene el perfil en la parte posterior) en la simulación con respecto al caso real que hacen que los resultados muestren siempre una misma tendencia, pero no coincidan con total exactitud.

Además, mediante Ansys se ha conseguido simular un flujo bifásico debido a la aparición de la cavitación. Así pues, se ha podido ver para que valores del coeficiente de cavitación σ se empieza a producir la cavitación ($\sigma=0,6$), para que valores pasa de ser una lámina de cavitación estable (desde $\sigma=0,6$ hasta $\sigma=0,3$) a inestable (entre $\sigma=0,3$ y $\sigma=0,2$ aproximadamente) y finalmente para que valores se produce la supercavitación (a partir de $\sigma=0,2$ aproximadamente).

Resulta también muy interesante a la vez que importante el hecho de ver que desde que aparece cavitación hasta que aparece la supercavitación, el coeficiente de sustentación (C_L) pasa a incrementar su valor de manera progresiva y rápida, mientras que el coeficiente de resistencia al avance (C_D) decrece de forma moderada o se mantiene más o menos constante. Este hecho da a entender que el fenómeno de la cavitación puede ser favorable en según qué condiciones ya que como vemos hace que el perfil tenga más sustentación y una mejor resistencia al avance si haber aumentado la velocidad ni el valor del ángulo de incidencia.

Finalmente, cabe decir que este proyecto pretende servir como iniciación y fuente de inspiración para futuros proyectos que se quieran desarrollar sobre este mismo tema perfeccionando cada vez más las características y parámetros de simulación utilizados con el fin de poder llegar a simular con la mayor exactitud posible el fenómeno que ha sido objeto de estudio durante este proyecto.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a toda mi familia y amigos más cercanos por el cariño, alegría y soporte que me han aportado a lo largo de mis estudios universitarios.

Especialmente, me gustaría agradecer y destacar la figura de mis padres: Manel y Laura; mis abuelos: Fernando, Maruja y Pilar y mis tíos: Óscar y Diego. Durante estos años han sido las personas más importantes e influyentes tanto de mi vida como de mi carrera universitaria y desde luego sin su apoyo, confianza y motivación incondicional todo esto hubiera sido mucho más difícil de conseguir.

Por último, quiero agradecer a mi tutor el Sr. Francesc Xavier Escaler Puigoriol, la ayuda y apoyo que me ha prestado desde el primer momento. Así mismo, también me gustaría destacar la paciencia, disponibilidad y gran interés que ha mostrado siempre para enseñarme, guiarme, corregirme y animarme en todo momento durante la elaboración de mi trabajo final de grado. Quiero destacar que ha sido un placer poder contar con él de tutor y que es un gran profesional y sobre todo una gran persona.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] WHITE, F., *Mecánica de Fluidos*, Nueva York: McGrawHill. 2008.
- [2] BOSSER, J. *Vademécum de mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas*, Barcelona: ETSEIB - CPDA. 1985.
- [3] CRESPO, A. *Mecánica de Fluidos*. Barcelona: Thomson, Dundee. 2006.
- [4] BARRERO RIPOLL, A., PÉREZ-SABORID SÁNCHEZ-PASTOR, M. *Fundamentos y aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*, Madrid. McGrawHill. 2007.
- [5] G.M. TSEITLIN, M.I. SOLTS, V.M. POPOV. *Aerodinámica y dinámica del vuelo de las aeronaves*. 1985.
- [6] PEYRET, R., TAYLOR, T. *Computational Methods for Fluid Flow* . University of Nice.
- [7] FRICK, CHARLES W. *Experimental Investigation of NACA submerged on water*. NACA, November 13, 1945.

Bibliografía Complementaria

- [8] Apuntes de la asignatura troncal de tercer curso de Grado en Tecnologías Industriales '*Mecánica de Fluidos*', Barcelona: ETSEIB-UPC 2013.
- [9] Tutorial de Ansys: *Workshop 05, Fluid Flow around the NACA 0012 airfoil*.
- [10] Tutorial de Ansys: *Workshop 07, Cavitating Centrifugal Pump*.